



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
REGISTRADOR DE VARIABLES ELÉCTRICAS PORTÁTIL
TRIFÁSICO PARA EVALUAR CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Autores:

Aroni V. Ever E.

Cortez G. Evelio F.

Tutora:

Ing. Milagros Peña

Naguanagua, Noviembre de 2011



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
REGISTRADOR DE VARIABLES ELÉCTRICAS PORTÁTIL
TRIFÁSICO PARA EVALUAR CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRICISTA

Autores:

Aroni V. Ever E.
Cortez G. Evelio F.

Naguanagua, Noviembre de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE REGISTRADOR DE VARIABLES ELÉCTRICAS PORTÁTIL TRIFÁSICO PARA EVALUAR CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA”**, realizado por los Bachilleres: EVER ARONI C.I. 17.398.585 y EVELIO CORTEZ C.I. 18.361.158, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Milagros Peña
TUTOR

Prof. Eva Monagas
JURADO

Prof. Wilmer Sanz
JURADO

Naguanagua, Diciembre de 2011



AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecemos a Dios por darnos salud, paciencia y voluntad de finalizar esta etapa de nuestras vidas.

De igual manera, hacemos público nuestro sincero agradecimiento a las siguientes personas:

- **A la Prof. Milagros Peña**, por su paciencia y guía a lo largo de todo trabajo de grado, y su soporte en el área de calidad de energía
- **Al Ing. José Rodríguez**, por su asesoramiento en la selección del microcontrolador.
- **Al Prof. Wilmer Sanz**, por su asesoramiento en el área de sistemas de adquisición de datos.
- **Al Prof. Andrés Simone**, por su colaboración en la elaboración de circuitos impresos con bakelitas presensibilizadas.
- **Al Prof. Antonio Millán**, por su asesoramiento en lo concerniente acondicionamiento de señales.
- **Al Ing. Ernesto Camacho e Ing. Jesús Urbina**, por su asesoramiento en lo que a equipos registradores se refiere.
- **Al Ing. Gabriel Fernández**, por su apoyo en la parte de programación del microcontrolador.
- **A Javier Vargas**, por su apoyo en la elaboración de circuitos impresos con bakelitas fenólicas.
- **A José Hernández**, por su apoyo en la programación con Visual Basic.
- **A la Lic. Nancy Barrena**, por su asesoramiento en el área de metodología y redacción.
- **A la Empresa Rhodia de Venezuela** con su aporte a través del proyecto LOCTI N° 35A009400118.



DEDICATORIA

En primer lugar a mis padres Sonia y Santiago, ya que a ellos les debo quien soy hoy en día.

A mis amigos Marco Filomeno, José Hernández, Javier Vargas, Guillermo Rojas, William Rojas, Elizabeth Castillo, Gabriel Aljibes, Desiree Melero, Ever Aroni, Yanitza Trosel, Alfredo Cueche, Carolina Vilachá, Roberto Muñoz, Rafael Silva, Antonio Toledo, Arturo Solano, Lisette Hernández, José Tortolero, José Acosta, Lucia Lucena, Johanna Moreno, Liseth Prieto, Glenda Gonzalez y Patricia Zambrano, ya que todos ellos de alguna u otra manera me ayudaron en mi paso por esta etapa de la vida.

Evelio Cortez



DEDICATORIA

A nuestro Padre Celestial y su Hijo Jesucristo, quienes hacen posible la vida, y me han bendecido, protegido y alentado a culminar esta meta.

A mis padres Alfonso, Teresa y mi esposa Yusbelys ya que a ellos les debo quien soy hoy en día, gracias por su esfuerzo, inmenso amor, paciencia y confianza.

A mi familia, amigos y compañeros de trabajo quienes siempre me han apoyado y animado a cumplir esta meta tan importante para mi progreso.

Ever Aroni



RESUMEN

El objetivo principal de este proyecto fue el diseño y construcción de un prototipo de registrador de variables eléctricas portátil trifásico para evaluar calidad de energía eléctrica, para que el Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo lo utilice como herramienta en su línea de investigación de Calidad de Energía y Eficiencia Energética, ya que actualmente el departamento no cuenta con un equipo para llevar a cabo estudios de calidad de energía. Para el logro de nuestro objetivo principal, se realizaron satisfactoriamente una serie de pasos, los cuales se nombraran a continuación: especificar los parámetros necesarios para evaluar calidad de energía eléctrica; seleccionar el microcontrolador que gobierne el sistema de adquisición de datos; diseñar y construir el sistema de acondicionamiento de las señales analógicas para su posterior conversión a una señal digital; desarrollar el software de operación del microcontrolador para la obtención y almacenamiento de los datos; diseñar y construir el sistema de adquisición de las señales analógicas para su conversión a una señal digital; implementar el software necesario para el posterior análisis de los datos recabados por el equipo registrador; ensamblar y calibrar el prototipo del equipo desarrollado y por ultimo elaborar las conclusiones y recomendaciones del proyecto.



INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica es uno de los principales servicios en las sociedades modernas para el soporte de la vida cotidiana. Los consumidores de electricidad poco a poco han tomado conciencia de la necesidad de contar con un servicio de alto nivel en términos de calidad en la tensión proporcionada por las compañías suministradoras.

Para el análisis y medición de la calidad de energía es necesario llevar cabo un proceso conocido como “Campañas de Medición”, proceso que se realiza mediante la utilización de equipos registradores de variables eléctricas, cumpliendo con los requerimientos mínimos para el estudio de señales establecidos por la Norma de Fiscalización de Empresas de Distribución de Electricidad.

El enfoque principal de este trabajo consiste en el diseño y construcción de un prototipo de registrador de variables eléctricas portátil trifásico para evaluar calidad de energía eléctrica, para que el Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo lo utilice como herramienta en su línea de investigación de Calidad de Energía y Eficiencia Energética.

El presente trabajo está conformado por cinco capítulos los cuales se describen a continuación:

- ✓ *Capítulo 1*, en este se realiza el planteamiento del problema, el cual contempla la justificación de este trabajo de grado, los objetivos y el alcance, para el diseño del prototipo.
- ✓ *Capítulo 2*, está conformado por los antecedentes del trabajo a desarrollar y las bases teóricas, que permitirán cumplir con la implementación propuesta.



Introducción



- ✓ *Capítulo 3*, se describe la metodología que se lleva a cabo para la elaboración del presente trabajo de grado.
- ✓ *Capítulo 4*, denominado como Análisis de los Resultados, presenta una descripción detallada de los resultados obtenidos en este trabajo especial de grado.
- ✓ *Capítulo 5*, presenta las conclusiones y las recomendaciones como resultado del diseño realizado.



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribución gaussiana de la banda permitida de tensión	17
Figura 2.2 - Sags	18
Figura 2.3 Swells	19
Figura 2.4 – Muecas	20
Figura 2.5 – Interrupciones	20
Figura 2.6 – Impulso de Tensión	21
Figura 2.7 – Sobretenión	22
Figura 2.8 – Ruido eléctrico	22
Figura 2.9 – Señal de tensión en presencia de interarmónicos	23
Figura 2.10 – Fluctuación rápida de tensión	26
Figura 2.11 - Diagrama del bloques del Flickermetro	27
Figura 2.12 – Distorsión armónica	29
Figura 2.13 – Triangulo de Potencia y potencia de distorsión	38
Figura 2.14 – Componentes Simétricas	41
Figura 2.15 – Diagrama general de un sistema de adquisición de datos	46
Figura 2.16 – Seguidor de tensión	52
Figura 2.17 - Restador de Tensión	53
Figura 2.18 - Amplificador Inversor	54
Figura 3.1 - Diagrama de las Fases desarrolladas	60
Figura 3.2 – Secuencia de muestreo de señales incluyendo retardo	71
Figura 4.1 - Canal de acondicionamiento de la señal de tensión	83
Figura 4.2 - Canal de acondicionamiento de la señal de corriente	84



Índice de Figuras



Figura 4.3 - Fuente de alimentación	85
Figura 4.4 - Diseño en digital de la tarjeta de acondicionamiento	86
Figura 4.5 - Vista real de la parte frontal de la tarjeta de acondicionamiento	88
Figura 4.6 - Vista real de la parte trasera de la tarjeta de acondicionamiento	88
Figura 4.7 - Identificación de los pines del DSPIC30F6014A	89
Figura 4.8 - Vista frontal del microcontrolador	90
Figura 4.9 - Vista trasera del microcontrolador	91
Figura 4.10 - Esquema de conexión del MAX232	92
Figura 4.11 - Esquema de conexión del DS1307	93
Figura 4.12 - Esquema de conexión con la memoria SD	94
Figura 4.13 - Diseño en digital de la tarjeta de adquisición	95
Figura 4.14 - Vista real de la parte frontal de la tarjeta de adquisición	96
Figura 4.15: Vista real de la parte frontal de la tarjeta de adquisición	97
Figura 4.16 - Panel frontal	98
Figura 4.17 - Cableado Interno	99
Figura 4.18 - Pinzas amperimétricas	100
Figura 4.19 - Caja del transformador de alimentación	101
Figura 4.20 - Transformador de alimentación	101
Figura 4.21 - Diagrama de flujo simplificado del programa implementado en el DSPIC.	103
Figura 4.22 - Módulos de la Interfaz de Usuario del equipo	104
Figura 4.23 - Cuadro de dialogo para cargar el archivo de muestras	106
Figura 4.24 - Pestañas con las graficas de las variables de interés	107
Figura 4.25 – Grafica con “zoom”	107
Figura 4.26 - Cuadro d Dialogo para la generación del reporte	108



Índice de Figuras



Figura 4.27 - Esquema de montaje para realización de la campaña de prueba	110
Figura 4.28 - Prototipo y Analizador de Parámetros CVM-NRG96	110
Figura 4.29 - Carga trifásica y dimmers	111
Figura 4.30 - Variac utilizado como fuente	111
Figura 4.31 - Voltajes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	112
Figura 4.32 - Corrientes RMS promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	112
Figura 4.33 - Energía entregada en cada periodo de 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	113
Figura 4.34 - THD's de los Voltajes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	113
Figura 4.35 - THD's de las Corrientes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	114
Figura 4.36 - Factores de Potencia promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	114
Figura 4.37 - Asimetrías promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	115
Figura 4.38 – Montaje para campaña de prueba de 1 día	126
Figura 4.39 – Voltajes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	127
Figura 4.40 – Corrientes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	127
Figura 4.41 - Energía entregada en cada periodo de 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	128
Figura 4.42 - THD's de los Voltajes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	128
Figura 4.43 - THD's de las Corrientes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora	129
Figura 4.44 - Factores de Potencia promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	129



Figura 4.45 - Asimetrías promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día	130
---	-----



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	
INDICE DE TABLAS	
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos especificos	6
1.3 Justificacion	7
1.4 Alcance y limitaciones	8
1.5 Recursos	9
CAPITULO II	10
2.1 Antecedentes	10
2.2 Bases teoricas y definicion de terminos basicos	12
2.2.1 Definiciones principales referentes a calidad de energia	13
2.2.1.1 Nivel de tension	13
2.2.1.2 Perturbaciones en la onda de tension	18
2.2.1.2.1 Sags (Dips según norma IEC o Huecos de Tensión)	18
2.2.1.2.2 Swells (Dilatación de voltaje)	19
2.2.1.2.3 Muecas (Notching)	19
2.2.1.2.4 Interrupciones	20
2.2.1.2.5 Impulsos de tensión	21
2.2.1.2.6 Sobretensiones	21
2.2.1.2.7 Ruido eléctrico	22
2.2.1.2.8 Variaciones de frecuencia	23



2.2.1.2.9 Interarmónicos	23
2.2.1.3 Fluctuaciones rápidas de tensión	26
2.2.1.4 Flicker	26
2.2.1.5 Distorsión armónica	29
2.2.1.6 Transformada Discreta de Fourier o DFT (Discrete Fourier Transform)	31
2.2.1.7 Transformada Rápida de Fourier (FFT)	32
2.2.1.8 Distorsión armónica total de la corriente (THDi)	33
2.2.1.9 Frecuencia de Nyquist	34
2.2.1.10 Relación de Parseval	34
2.2.1.11 Distorsión por muestreo	35
2.2.1.12 Efecto Leakage	35
2.2.1.13 Valor r.m.s. verdadero (true r.m.s.)	35
2.2.1.14 Cálculo de la potencia activa	37
2.2.1.15 Cálculo de Potencia Aparente	37
2.2.1.16 Potencia de distorsión	38
2.2.1.17 Factor de Potencia	39
2.2.1.18 Componentes Simétricas	41
2.2.1.19 Asimetría (Desbalances de tensión)	42
2.2.2 Los equipos medidores de calidad de energía	42
2.2.3 Definiciones principales de Adquisición de Datos	45
2.2.3.1 Tipos de señales	46
2.2.3.2 Los transductores	47
2.2.3.3 Acondicionamiento de las señales	47
2.2.3.4 Acondicionamiento de las señales	48
2.2.3.5 DSP y DSC	48
2.2.3.6 Comunicación RS-232	49
2.2.3.7 Comunicación Bus I2C	49
2.2.3.8 Comunicación SPI (Serial Peripheral Interface)	50
2.2.3.9 Velocidad de muestreo de la señal	51



Índice General



2.2.3.10 Velocidad de muestreo de la señal	51
2.2.4 Circuitos componentes del sistema de adquisición de datos	52
2.2.4.1 Seguidor de tensión	52
2.2.4.2 Restador de tensión	52
2.2.4.3 Amplificador Inversor	53
2.3 Definición de términos	54
CAPITULO III	57
3.1 Diseño y tipo de investigación	57
3.2 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	58
3.2.1 Instrumentos de recolección de datos	58
3.2.2 Técnicas para la recolección de datos	59
3.3 Análisis e Interpretación de Datos	60
3.4 Procedimiento Metodológico	60
CAPITULO IV	82
4.1 Hardware del registrador	82
4.1.1 Tarjeta de Acondicionamiento de las señales	82
4.1.1.1 Acondicionamiento de las señales de tensión	83
4.1.1.2 Acondicionamiento de las señales de corriente	84
4.1.1.3 Fuente de alimentación de la tarjeta	85
4.1.1.4 Diseño del circuito impreso de la tarjeta de acondicionamiento	86
4.1.2 Tarjeta de adquisición de datos	89
4.1.2.1 Microcontrolador	89
4.1.2.2 Módulo de comunicación serial (RS-232)	91
4.1.2.3 Reloj de tiempo real DS1307	93
4.1.2.4 Memoria SD	93
4.1.2.5 Diseño del circuito impreso de la tarjeta de adquisición	95
4.1.3 Caja de proyectos y elementos externos	98
4.2 Software del DSPIC	102
4.3 Interfaz de usuario del registrador	104



Índice General



4.3.1 Programación de la Campaña	105
4.3.2 Análisis de la campaña de medición	105
4.3.3 Resultado de la Campaña	108
4.4 Campañas de prueba	109
4.4.1 Campaña de prueba de 1 hora	109
4.4.2 Campaña de prueba de 1 día	126
CAPITULO V	131
5.1 Conclusiones	131
5.2 Recomendaciones	134
BIBLIOGRAFIA	135
ANEXOS	137



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Variaciones porcentuales permitidas de los niveles de tensión, con respecto al valor de tensión nominal	13
Tabla 2.2 Cantidad mínima de puntos de medición según la densidad del municipio	14
Tabla 2.3 Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos presentes en los sistemas de potencia, según IEEE Std 1159-1995	24
Tabla 2.4 Características típica de las perturbaciones que afectan la forma de onda de tensión	40
Tabla 2.5 Instrumentos medidores de calidad de energía y sus características	44
Tabla 3.1 Caracteres asociados a las duraciones de Campaña	77
Tabla 4.1 Conexión SD-DSPIC	94
Tabla 4.2 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_a medidos por el prototipo y el analizador	116
Tabla 4.3 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_b medidos por el prototipo y el analizador	116
Tabla 4.4 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_c medidos por el prototipo y el analizador	117
Tabla 4.5 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_a medidos por el prototipo y el analizador	117
Tabla 4.6 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_b medidos por el prototipo y el analizador	118
Tabla 4.7 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_c medidos por el prototipo y el analizador	118
Tabla 4.8 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase A medida por el prototipo y el analizador	119
Tabla 4.9 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase B medida por el prototipo y el analizador	119
Tabla 4.10 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase B medida por el prototipo y el analizador	120



Índice de Tablas



Tabla 4.11 Cuadro comparativo de los THD's de V_a medidos por el prototipo y el analizador	120
Tabla 4.12 Cuadro comparativo de los THD's de V_b medidos por el prototipo y el analizador	121
Tabla 4.13 Cuadro comparativo de los THD's de V_c medidos por el prototipo y el analizador	121
Tabla 4.14 Cuadro comparativo de los THD's de I_a medidos por el prototipo y el analizador	122
Tabla 4.15 Cuadro comparativo de los THD's de I_b medidos por el prototipo y el analizador	122
Tabla 4.16 Cuadro comparativo de los THD's de I_c medidos por el prototipo y el analizador	123
Tabla 4.17 Cuadro comparativo de los THD's de V_a calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel	124
Tabla 4.18 Cuadro comparativo de los THD's de V_b calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel	125
Tabla 4.19 Cuadro comparativo de los THD's de V_c calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel	125



CAPÍTULO I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El suministro de energía eléctrica es de vital importancia para el funcionamiento de la sociedad y cada vez son más los dispositivos que requieren de alimentación eléctrica para el desarrollo de cualquier actividad [1].

El proceso de generación de la energía eléctrica se lleva a cabo en las centrales eléctricas, y desde allí la energía es llevada a los consumidores por medio de las líneas de transmisión, pero en el proceso de transporte, la señal de voltaje puede verse alterada debido a la presencia de cargas de naturaleza no lineal, provocando un mal funcionamiento y daños en los equipos eléctricos [1].

La calidad de energía siempre ha sido un factor muy importante dentro de un sistema eléctrico. Sin embargo, por muchos años la definición de la calidad de energía se limitaba solo a la confiabilidad del sistema [1].

En el pasado, los clientes a quienes se les suministraba la energía eléctrica tenían cargas de naturaleza lineal. Al proveer un voltaje sinusoidal, la corriente resultaba también sinusoidal y éstas en general no eran sensibles a las variaciones momentáneas de la tensión de suministro. Pero estas cargas han sufrido transformaciones. Los dos cambios más importantes que han sufrido las características de las cargas de los consumidores de los sistemas eléctricos han sido:

- La sensibilidad de las cargas en sí mismas, en vista de que actualmente los nuevos equipos incluyen controles basados en microprocesadores y equipamiento de electrónica de potencia, elementos no lineales que los hacen sensibles a perturbaciones de la tensión, además de las posibles interrupciones de energía,



resultando en innecesarios disparos en las protecciones o en el mal funcionamiento de un proceso industrial importante.

- El hecho de que estas mismas cargas sensibles estén interconectadas en grandes redes eléctricas con procesos automatizados, y que a su vez son las que generan las mismas perturbaciones que las afectan, incrementando aún más el problema y requiriendo una buena referencia de potencial de tierra, para todo el sistema. [2].

Todas estas transformaciones en las cargas han ampliado la definición de calidad de energía, la cual no solo se refiere a la ausencia de interrupciones, sino también a las sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario. Además le concierne la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico [3].

Es importante resaltar que el diseño y desarrollo del prototipo fue durante el periodo del 2009 al 2010, y de acuerdo con lo establecido en la Ley Orgánica del Servicio Eléctrico (Vigente hasta Diciembre de 2010) las empresas que prestan estos servicios, estaban comprometidas a realizarlo dentro de parámetros de Calidad y Confiabilidad, como por ejemplo lo indica el Art. 2 “El estado velará porque todas las actividades que constituyen el servicio eléctrico se realicen bajo los principios de equilibrio económico, confiabilidad, eficiencia, calidad, equidad, solidaridad, no-discriminación y transparencia, a los fines de garantizar un suministro de electricidad al menor costo posible y con la calidad requerida con los usuarios” y el Art. 36 “Las empresas de distribución de energía eléctrica tienen, entre otras, las obligaciones siguientes: Prestar el servicio de manera continua, eficiente, no discriminatoria y dentro de los parámetros de Calidad y atención a los usuarios, de acuerdo a esta Ley y a la normativa que, a ese efecto, dicte la Comisión Nacional de Energía Eléctrica”, de conformidad con lo pautado anteriormente las empresas necesitan asegurar el funcionamiento óptimo de sus instalaciones.



Capítulo I



Cabe destacar que La Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico, que entró en vigencia en Diciembre del 2010, con la cual las empresas que presten estos servicios, están comprometidas a realizarlo dentro de parámetros de Calidad y Confiabilidad, como lo indica el punto 3 del Art. 31 sobre Obligaciones del operador y prestador del servicio: “Prestar el servicio eléctrico bajo los criterios de confiabilidad, eficiencia, calidad, equidad, solidaridad, no discriminación, transparencia, sustentabilidad económica y financiera, cumpliendo las normas técnicas de instalación, operación y de seguridad, según la normativa que a este efecto apruebe el Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica.” de conformidad con lo pautado anteriormente las empresas necesitan asegurar el funcionamiento óptimo de sus instalaciones.

En Venezuela la calidad del servicio prestado por los agentes que desarrollan la actividad de distribución de electricidad, se evalúa en las siguientes áreas: Calidad del Producto Técnico, Calidad del Servicio Técnico y Calidad del Servicio Comercial. [4]

La Calidad del Producto Técnico está determinada por mediciones realizadas de los niveles de tensión del fluido eléctrico y la forma de onda de la tensión suministrada por la distribuidora. La Calidad del Servicio Técnico está determinada por las interrupciones del fluido eléctrico conforme a la frecuencia y duración de las mismas. La Calidad del Servicio Comercial mide la atención de los requerimientos y reclamos de los usuarios. [5]

Para el análisis y medición de la calidad de energía, es necesario realizar un proceso conocido como “Campaña de Medición”, en el cual se recopila la información referente a la calidad del producto técnico; dicha recopilación se hace mediante un instrumento que registre las variables necesarias para dicho análisis, cumpliendo con los requerimientos mínimos para el estudio de señales establecidos por la norma ya antes mencionada.



El Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo posee una línea de investigación en área de Calidad de Energía y Eficiencia Energética. En esta línea de investigación no se han llevado a cabo todos los estudios en el área que se hubiesen deseado realizar a causa de no contar con un instrumento de medición capaz de realizar las campañas de medición bajo las especificaciones de la norma. Esto limita a la línea de investigación, ya que sin tener independencia en este aspecto no se han podido realizar todos los estudios calidad de energía eléctrica. La solución a esta situación sería adquirir un equipo analizador de energía eléctrica, pero estos equipos resultan ser muy costosos y además no son de fabricación nacional, lo que hace aun más difícil su adquisición.

Como solución a lo antes expuesto, se propuso el diseño y construcción de un prototipo de instrumento portátil de registro y análisis de las variables eléctricas de calidad de energía para el Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Para ello se identificaron cuáles son los parámetros requeridos para evaluar la calidad de energía con un equipo portátil, cual debería ser el microcontrolador para gobernar la adquisición de datos, cuales son los requerimientos de memoria, cuál es el software requerido y cuál es el modelo más ergonómico final para cumplir con los propósitos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Diseñar y construir el prototipo de un registrador de variables eléctricas portátil trifásico para evaluar calidad de energía eléctrica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Especificar los parámetros necesarios para evaluar calidad de energía eléctrica.



- Seleccionar el microcontrolador que gobierne el sistema de adquisición de datos.
- Diseñar y construir el sistema de acondicionamiento de las señales analógicas para su posterior conversión a una señal digital.
- Desarrollar el software de operación del microcontrolador para la obtención y almacenamiento de los datos.
- Diseñar y construir el sistema de adquisición de las señales analógicas para su conversión a una señal digital.
- Implementar el software necesario para el posterior análisis de los datos recabados por el equipo registrador.
- Ensamblar y calibrar el prototipo del equipo desarrollado.

1.3 Justificación

Una insuficiente calidad en el suministro de la energía eléctrica afecta, en mayor o menor grado, a otras tecnologías y procesos industriales, donde las pérdidas económicas que se generan por este concepto pueden llegar a ser considerables. La deficiente calidad en el suministro provoca una operación ineficiente e impropia, entre otros, en las redes eléctricas, lo cual conlleva a averías o incremento en los costos de operación, los que, al final, redundan en pérdidas para las compañías del servicio eléctrico. Es por ello que el estudio de la calidad de energía en los sistemas de distribución debe implementarse para evitar las consecuencias antes mencionadas, y así lograr un beneficio común entre la empresa de servicio eléctrico y el consumidor.

La dificultad para adquirir equipos registradores en el mercado venezolano hace que no se tengan los suficientes datos de la calidad del servicio prestado por las empresas de suministro eléctrico y del efecto que podrían tener en el sistema y sobre las cargas sensibles, a pequeñas y grandes variaciones de las condiciones nominales de trabajo [4]. En vista de los elevados costos de adquisición de los equipos registradores de variables eléctricas para calidad de energía, y la dependencia tecnológica del país, así como



también en relación a las divisas, aunado a la necesidad de desarrollo tecnológico en el país y sus posibilidades [2], se propuso desarrollar un prototipo de equipo registrador de variables eléctricas para calidad de energía.

El presente proyecto fue diseñado y desarrollado en el periodo del 2009 al 2010 y pertenece a la línea de investigación del Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo, en el área de Calidad de Energía y Eficiencia Energética y podrá ser usado por profesores y estudiantes en el desarrollo de proyectos que necesiten la información de ciertas variables eléctricas de una red de baja tensión relacionada con la calidad del producto técnico.

1.4 Alcance y limitaciones

En este proyecto se diseñó y construyó el prototipo de un equipo registrador de variables eléctricas para evaluar calidad de energía para el Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo. Con este equipo no se pretenden solucionar los problemas asociados a la calidad de energía, sino mas bien proporcionar un instrumento de apoyo para estudios relacionados con calidad de energía en sistemas eléctricos de baja tensión, por lo tanto, solo se encargará de almacenar la data necesaria y realizar el posterior análisis para evaluar la calidad de energía eléctrica.

El prototipo es trifásico, ya que se quiere estudiar el comportamiento de la red en su totalidad, y para ello se deben medir las tensiones y corrientes de las tres fases. Además el mismo tiene la capacidad de almacenar los datos por sí mismo, es decir, sin el uso de alguna unidad externa, con la finalidad de que estos datos queden almacenados para futuros estudios. Y a través de un computador portátil se pueden procesar y analizar los datos almacenados.



1.5 Recursos

Para la ejecución del trabajo, se requirió de personal técnico y personal con experiencia como asesores del proyecto, una computadora portátil adecuada con su maletín, software con licencia necesario para la programación y desarrollo del equipo, un kit de herramientas básicas para labores eléctricas con su caja y candado, multímetro, impresora, cartuchos de tinta, consumibles, un armario con cerradura, textos y normas en el área, fotocopias, viáticos, además de todos los elementos necesarios que resulten del diseño del equipo registrador (adecuación y adquisición de señales analógico-digitales, procesamiento y producto). Para el desarrollo del presente proyecto se contó con el financiamiento de la empresa privada Rhodia de Venezuela, a través de la alianza UC Empresas en el marco de la LOCTI.



CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

En esta sección del trabajo de investigación se estudia con detalle, el diseño y tipo de la investigación, técnicas de recolección y análisis de datos, se describe el conjunto de pasos ordenados, así como procedimientos o fases metodológicas, las técnicas de recolección de información y el análisis de los datos, todos estos puntos necesarios para el desarrollo del presente trabajo de investigación, de modo que se logre una visión clara de cómo llevar a cabo el mismo.

3.1. Diseño y tipo de investigación

Según Hernández Sampieri, Roberto (1998; pág. 105) en su libro titulado “Metodología de la investigación” plantean este tipo de trabajo como un estudio experimental ya que en él se manipulan deliberadamente una o más variables independientes para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes. La investigación es de tipo experimental enmarcada en la modalidad de un proyecto factible, aplicada a la implementación de un modelo. Su principal objetivo es el diseño y construcción de un prototipo que emule el funcionamiento de equipos de medición de calidad de energía eléctrica disponibles en el mercado, para desarrollar mejoras en versiones futuras.

En el desarrollo de esta investigación se sintetizan los métodos y procedimientos de cálculo de variables eléctricas de calidad de energía en una serie de códigos en lenguaje de programación, para dirigir las acciones de un prototipo, demostrando con los resultados obtenidos, el funcionamiento del programa diseñado.

Los conocimientos que se obtuvieron en la investigación podrán ser utilizados posteriormente en el desarrollo de futuras investigaciones relacionadas a la construcción de equipos registradores en la línea de investigación de Calidad de Energía. Con la aplicación



de los métodos de cálculo establecidos en el programa de funcionamiento, será posible realizar el diseño de las siguientes etapas del de un prototipo definitivo que cumpla con lo establecido por las Normas de Fiscalización en su totalidad, además de ser apto para su aprobación por el Servicio Autónomo Nacional de Normalización, Calidad, Metrología y Reglamentos Técnicos (SEMCAMER) y cuya utilización arroje resultados de campañas de medición que serán analizados mediante el uso de herramientas estadísticas, como base para realizar acciones correctivas en el sistema eléctrico, específicamente en los puntos donde la calidad de la energía suministrada no cumpla con los estándares establecidos por la Norma de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad.

3.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En función de los objetivos definidos en el presente estudio, se emplearán una serie de instrumentos y técnicas de recolección de la información, orientadas de manera esencial a alcanzar los fines propuestos.

3.2.1 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos según Jacqueline Hurtado de Barrera (1998), constituyen un conjunto de pautas e instrucciones que orientan la atención del investigador hacia un tipo de información específica para impedir que se aleje del punto de interés; los instrumentos le indican qué tipo de preguntas hacer y con cuál contenido, o cuáles situaciones observar y en qué momento. Si bien la técnica indica “cómo” se va a recoger la información, el instrumento señala “cuál” información seleccionar. Dichos instrumentos de recolección de datos son:

- Guía de observación.
- Guía de entrevista.
- Guía de observación.
- Matriz de análisis.



- Guía de entrevista.

3.2.2. Técnicas para la recolección de datos

Las técnicas utilizadas para recopilar la información fueron las siguientes:

- **Técnicas Documentales:** a partir de la observación documental, como punto de partida para la presente investigación, se realizó un análisis de fuentes documentales mediante lectura general de textos relacionados con el tema y otros aspectos técnicos que son fundamentales en el desarrollo de planteamientos esenciales y aspectos lógicos de su contenido, a propósito de extraer algunos datos bibliográficos útiles para el estudio que se está realizando. Estas técnicas también aplican a la búsqueda de la información por Internet para artículos referentes al tema de investigación, definiciones y bibliografías acerca de trabajos similares.
- **Entrevistas:** se realizaron entrevistas con los especialistas en calidad de energía de ELEVAL para que nos las directivas de cómo deben hacerse la campañas de medición, la forma en la que ellos instalan sus equipos y como procesan la información recopilada. También se entrevistó a representantes de la empresa Power Quality en Caracas, los cuales se encargan de distribuir en Venezuela equipos de analizadores de calidad de energía eléctrica de la marca UNIPOWER, con ellos se discutió las características técnicas que sus equipos tienen con la finalidad de emularlas.
- **Observación:** Esta técnica se caracteriza por la visualización directa del entorno físico objeto de la investigación lo cual permite obtener información general y específica. Esta técnica se lleva a cabo estudiando el funcionamiento y las características de los equipos ya existentes en el mercado.
- **Instrumentos:** lápices, resaltadores, hojas, carpetas, cámaras fotográficas, computadores para almacenar los datos y cálculos, impresoras, fotocopadoras, etc.



- **Técnicas de entrevista no estructurada:** son investigaciones no sistemáticas que permiten obtener la idea general del proyecto y de los aspectos más importantes, utilizando la entrevista informal con expertos y especialistas en el área.

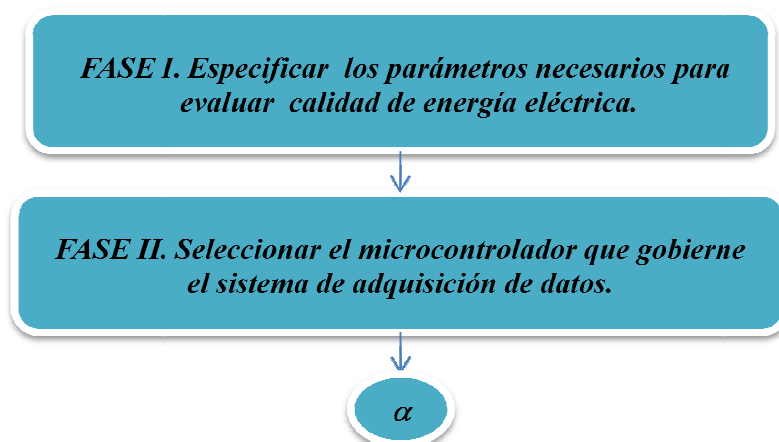
3.3. Análisis e Interpretación de Datos

La información recabada fué analizada de acuerdo a las exigencias de cada fase metodológica, la misma se organizó para dar respuesta a los objetivos planteados en el estudio, conectándolos con las bases teóricas que sustentan la misma, así como con los conocimientos que se disponen con relación al problema estudiado.

Para la programación del microcontrolador se utilizó el compilador Mikrobasic de la compañía Mikroelektronika, ya que este posee una serie de librerías que serán útiles para el desarrollo del presente proyecto. Para la visualización y procesamiento de la información recabada por el equipo, se creó una interfaz en la computadora utilizando el entorno de desarrollo Visual Basic.net, debido a su facilidad y flexibilidad de uso.

3.4 Procedimiento Metodológico

Para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos planteados, se llevaron a cabo 7. En la **figura 3.1** se presenta el diagrama de las fases desarrolladas:



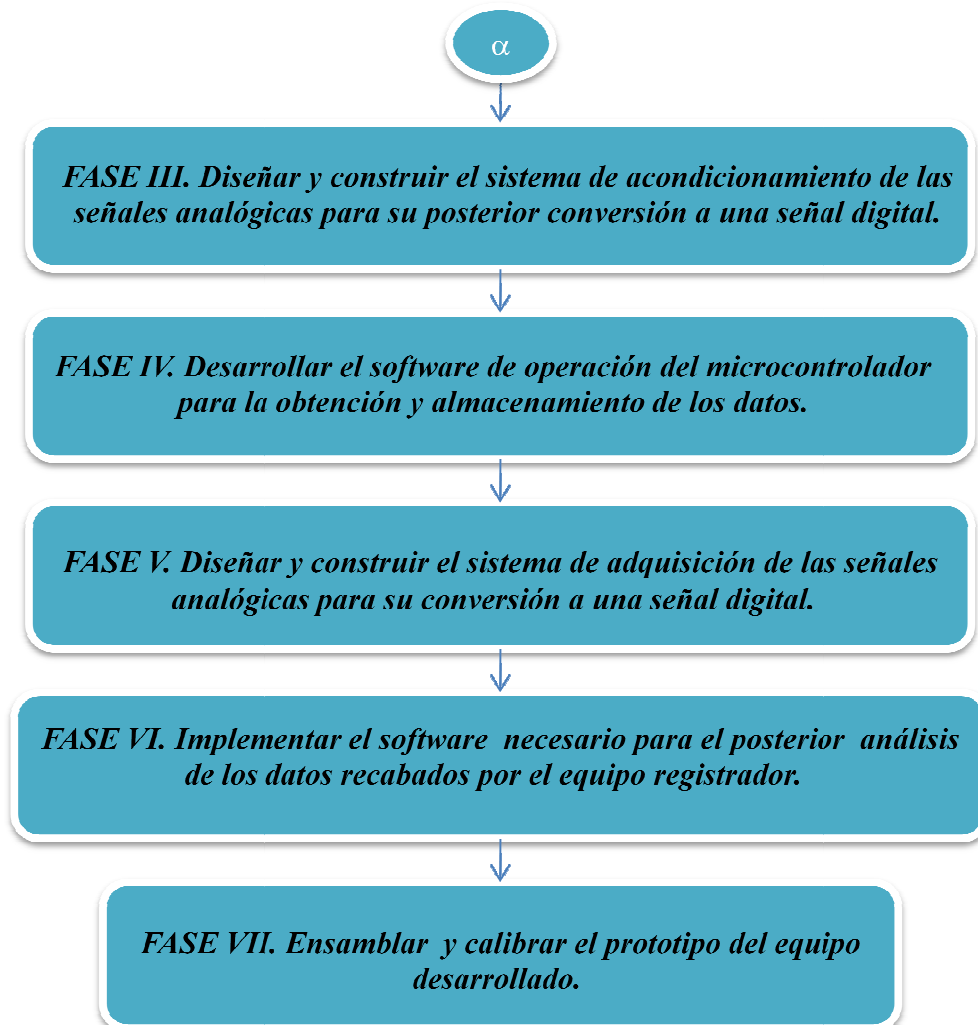


Figura 3.1 - Diagrama de las Fases desarrolladas



A continuación se describen las fases desarrolladas:

FASE I. Especificar los parámetros necesarios para evaluar calidad de energía eléctrica.

Actividades:

- 1. Investigar la norma que rige el estudio de calidad de energía eléctrica en Venezuela:*

El Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo, establece las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad, en esta norma se establecen los parámetros mínimos que debe cumplir el ente encargado de prestar el servicio eléctrico, así mismo establece las características técnicas que deben poseer los registradores que se utilizan para el estudio de calidad de servicio.

- 2. Determinar según la norma cuales son las variables eléctricas de interés en un estudio de calidad de energía eléctrica:*

Según las normas mencionadas en el punto anterior dichas variables son las siguientes:

- V_{rms} (V): Valor eficaz de la tensión.
- I_{rms} (A): Valor eficaz de la corriente.
- kWh (kWh): Energía.
- F_p : Factor de potencia
- THD: Distorsión Armónica Total.
- Pst: Índice de percepción de corta duración.
- Plt: Índice de percepción de larga duración.



Capítulo III



Para la recolección de los registros necesarios para el cálculo de estos indicadores la NCSDE (Norma de calidad de servicio de la distribución de la energía) establece las siguientes directrices:

- Los registros de las mediciones corresponderán al valor eficaz.
- El cálculo del valor eficaz se determinará con los valores recopilados en una ventana que como máximo tenga una duración de un (1) segundo.
- El valor promedio será calculado con todos los valores eficaces medidos.
- El período del promedio de las mediciones será de diez (10) minutos, es decir, se obtendrán como mínimo seiscientas (600) muestras.
- Todas las mediciones serán realizadas en cada una de las fases existentes en el punto de medición seleccionado.

La NCSDE implanta como parámetros para medir la calidad de energía eléctrica en un determinado punto de medición a los siguientes indicadores:

- **FEDT:** Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión, expresada en porcentaje.
- **FEES:** Frecuencia Equivalente de Energía Suministrada fuera de la banda permitida de tensión, expresada en porcentaje.
- **EEBC:** Energía entregada con baja calidad, expresada en kWh.

3. *Consultar con compañías de electricidad qué parámetros toman en cuenta a la hora de medir calidad de energía eléctrica:*

Se realizaron entrevistas con el Especialista en Calidad de Energía de la empresa ELEVAL, el Ing. Jesús Urbina, quien explicó a los investigadores cómo se realizaban las campañas de medición, las cuales duraban generalmente 1 día y habló sobre las prestaciones del equipo de medición con el que contaban, dicho equipo es el Memobox de



Capítulo III



LEM, el cual básicamente cumple con todos los requerimientos de la norma, en términos de precisión.

Posterior a las entrevistas en ELEVAL, se realizó una visita a la empresa Power Quality, quienes distribuyen los equipos UNIPOWER en Venezuela, dicha empresa está ubicada en Caracas, allí esta su laboratorio de calidad de energía en el cual efectúan pruebas de medición y equipos, allí se pudo observar el proceso de instalación y programación de los equipos, además de observar la forma en que se presentaban los datos en la interfaz de usuarios de los equipos.

4. Especificar las variables eléctricas que el prototipo va a medir:

Dado que el objetivo de esta investigación es la construcción de un prototipo, que luego será mejorado en posteriores proyectos, se decidió trabajar con las variables electricas más importantes, las cuales mencionamos a continuación:

- V_{rms} (V): Valor eficaz de la tensión.
- I_{rms} (A): Valor eficaz de la corriente.
- kWh (kWh): Energía.
- F_p : Factor de potencia.
- THD: Distorsión Armónica.
- Asimetría.

5. Establecer los niveles de tensión que se van a medir:

Debido a que el equipo es un prototipo para el Laboratorio de Maquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo, el nivel de tensión seleccionado para trabajar será el de 208/120V.



FASE II. Seleccionar el microcontrolador que gobierne el sistema de adquisición de datos.

Actividades:

1. *Establecer las características que debe tener el microcontrolador para cumplir con los requerimientos de las Normas de Fiscalización de Empresas de Distribución de Electricidad:*

El microcontrolador es el componente y equipo fundamental de todo el sistema, tomando en consideración su función y el modo de operación con los dispositivos periféricos. Según la NCSDE el Registrador debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Velocidad de muestreo: La velocidad de muestreo mínima es de 3KHz.
- Resolución mínima de convertidor A/D: Catorce (14) bits.
- Los equipos deben contar con puertos de comunicación para acceder a los archivos de las mediciones.
- El equipo registrador, bajo condiciones normales, debe tener capacidad de memoria para almacenar todos los parámetros requeridos por lo menos durante ocho (08) días continuos.

2. *Investigar en el mercado nacional, qué microcontroladores poseen las características establecidas en el punto anterior:*

Tomando en cuenta que existen una serie muy amplia de fabricantes de microcontroladores, tales como, Atmel, Microchip, Motorola, Texas Instruments, Siemens, entre otros, fue necesario investigar que fabricante era más factible de utilizar.

Luego de comparar a los diferentes fabricantes, como resultado se obtuvo que Microchip, es la empresa que posee una amplia gama de microcontroladores que pueden encontrarse en el mercado nacional y a su vez cumplir con los requerimientos exigidos por



la norma. Luego de esto investigando entre dicha gama de microcontroladores se obtuvieron dos posibles opciones, las cuales fueron el DSPIC30F4013 y el DSPIC30F6014A, ambos cumplen con los requerimientos de la norma.

3. Seleccionar el microcontrolador adecuado:

Tomando como base lo expuesto en el punto anterior y pensando en dejar abierta la posibilidad de mejoras y ampliaciones futuras del prototipo se eligió el DSPIC30F6014, el cual pertenece a una familia de microcontroladores que poseen amplias ventajas, tales como las que se mencionan a continuación:

- Disponible en encapsulado tipo TQFP de 80 pines.
- Arquitectura Harvard Modificada.
- 83 instrucciones base.
- Memoria Flash de 144 Kb.
- Hasta 48 mil instrucciones de tamaño Word.
- Memoria RAM de 8 Kb.
- Memoria EEPROM no volátil de 4 Kb.
- Capacidad de trabajar una velocidad de 30 MIPS (Millones de instrucciones por Segundo).
- Hasta 41 fuentes de interrupción.
- 5 contadores de 16 bits con la opción de conectarse en serie para tener un contador de 32 bits.
- 3 módulos de comunicación SPI.
- 1 modulo de comunicación I2C.
- Un convertidor analógico de 12 bits con:
 - Velocidad de muestreo de 200 Ksps.
 - Hasta 16 canales de entrada.



FASE III. Diseñar y construir el sistema de acondicionamiento de las señales analógicas para su posterior conversión a una señal digital.

Actividades:

1. *Seleccionar los transductores adecuados correspondientes a los niveles de tensión y corriente que se desean medir:*

Dado que se va trabajar solo con nivel de tensión de 208/120 V, se decidió hacer la transducción de tensión a través de divisores de tensión, debido a su practicidad y a su independencia de la frecuencia.

Los transductores están compuestos por una resistencia de $3,6\text{ M}\Omega$ a la entrada para asegurar la alta impedancia del transductor y seguido de una resistencia variable de $50\text{k}\Omega$ la cual servirá para calibración del transductor.

Por otra parte debido a que el equipo debe tener la facilidad de conectarse al sistema que se vaya a estudiar, sin alterar el mismo, es decir, sin realizar algún tipo de modificación para su instalación, lo más factible para el transductor de corriente será una pinza de tipo transformador de corriente, con una resistencia de $33\ \Omega$ en el secundario de las pinzas para transformar las señales de corriente en ondas de voltaje y puedan ser muestreadas por el conversor analógico digital.

2. *De acuerdo con los niveles de tensión y corriente a la salida de los transductores se determinaran que tipo de módulos se requieran (sumadores, amplificadores, seguidores) para acoplar las señales al conversor analógico digital del microcontrolador:*

Para el acondicionamiento de las señales de tensión de fase se tenía que tomar una onda de amplitud $169,7\text{ V}$ (120 V RMS) sin offset, y convertirla en una señal cuyo offset sea $2,5\text{ V}$ y de amplitud máxima de $2,5\text{ V}$ de manera tal que el conversor analógico digital pueda



Capítulo III



digitalizar la señal completa. La atenuación de amplitud se logró con los divisores de tensión, a la salida de los mismos se colocaron seguidores de tensión para darle estabilidad a las señales y establecer una alta impedancia de entrada. Después de los seguidores se dispusieron sumadores para introducir el offset de a cada señal de voltaje.

Para el caso de las corrientes de fase ocurrió lo contrario, ya que la tensión en el secundario de la pinzas tiene un valor pico de 200mV cuando el primario circula una corriente de 10A. Por lo cual era necesario hacer una amplificación, para poder tener una lectura más precisa de la señal. En primer lugar se colocó a la salida de las pinzas un seguidor también para estabilizar la señal, luego para no hacer la tarjeta más complicada aún, se decidió hacer un sumador con las resistencias ajustadas de manera tal que amplifique e introduzca el offset de 2,5 al mismo tiempo.

Para hacer más sencilla la tarjeta se utilizaron amplificadores operacionales del tipo LM324 los cuales poseen 4 operacionales en un solo circuito integrado y de esta manera se reduce la cantidad de dispositivos a alimentar.

Para alimentar a los operacionales y en general a todo el prototipo se diseñó una fuente diferencial de $\pm 9V$, en cascada con el regulador de 9 V se colocó otro de 5V para alimentar a la tarjeta donde se encuentra el DSPIC y a una resistencia variable para generar la señal de offset que va a los sumadores.

3. Ensamblar los módulos y realizar pruebas de calibración:

Para implementar la tarjeta se realizó el diseño del schematic en PCB Wizard, el cual incluyó tanto las etapas de acondicionamiento de tensión y corriente como la fuente de alimentación del equipo. Una vez terminado el schematic se procedió a crear el diseño de la tarjeta impresa el cual se realizó en bakelita de doble capa para que el recorrido de las pistas fuese más sencillo.



Capítulo III



Para crear la tarjeta con las pistas se imprimieron las dos caras de tarjeta en papel normal, la cara superior en espejo y la cara inferior normal. Una vez hecho esto se procedió a fotocopiar las impresiones en papel de transferencia, luego se tomo la bakelita fenólica de doble capa y a través de calor se transfirió el papel con toner a ambas caras de la bakelita utilizando una plancha.

Luego de esto se sumerge la tarjeta en cloruro férrico para eliminar el cobre excedente dejando solo el cobre debajo del toner y el papel. Ya con las pistas listas se procedió a abrir los huecos donde van dispuestos los elementos de la tarjeta utilizando un taladro de baja potencia y un mecha delgada.

Después de hacerle los huecos a la tarjeta se empezó a soldar los elementos a ella, una vez soldados se procedió a hacer pruebas en el laboratorio utilizando el osciloscopio, para verificar que la fuente alimentara correctamente a los amplificadores operacionales y que al colocar las señales tensión y corriente en la bornera de entrada se transformen en señales que oscilen entre 0-5V en los pines de salida.

FASE IV. Desarrollar el software de operación del microcontrolador para la obtención y almacenamiento de los datos.

Actividades:

- 1. Seleccionar el lenguaje de programación más óptimo según el microcontrolador seleccionado anteriormente:*

Para esta actividad se buscó un compilador compatible con la serie de Dspic y más específicamente con el DSPIC30F6A14A seleccionado para esta investigación. Además de contar con librerías para la comunicación serial con la computadora, librerías para la comunicación I2C con el reloj de tiempo real DS1307 y librerías para la comunicación SPI con la tarjeta micro SD, para el almacenamiento de las muestras.



Capítulo III



Se seleccionó el compilador Mikrobasic de la empresa Mikroelektronika, ya que cumple con los requerimientos antes mencionados y además porque utiliza BASIC como lenguaje el cual es familiar para los investigadores.

2. *Desarrollar subprogramas según las tareas necesarias, realizadas por el microcontrolador (adquisición de datos, generación de base temporal, almacenamiento de datos, comunicación, etc.):*

Para el desarrollo de esta actividad primero se tuvieron que establecer cuáles eran las funciones que el DSPIC debía realizar y se desarrollaron por separado, estas funciones fueron:

- a) Enviar y recibir data vía puerto serial a la computadora:

Para esta parte se realizaron pruebas enviando y recibiendo cadena de caracteres a través del puerto serial. Utilizando la librería del mikrobasic, en la cual se tiene que inicializar el módulo de comunicación serial correspondiente (El DSPI30F6014A posee dos módulos) indicando la velocidad de transmisión en baudios que se desee utilizar.

Una vez inicializado si se quiere enviar un carácter solo se tiene que colocar la instrucción para enviar y entre paréntesis el dato, si se quiere recibir un dato del puerto serial se utiliza una instrucción que chequea si el buffer del módulo ha recibido algún dato, de ser cierto se ejecuta la instrucción de leer dato recibido.

- b) Adquirir muestras por 6 de los canales del DSpic simultáneamente a una frecuencia de muestreo de al menos 3kHz por señal:

En este caso se decidió hacer la conversión manual, ya que en la instrucción de la librería para obtener muestras trae una configuración predeterminada y fija, y no es posible



controlar la velocidad de muestreo. Por lo cual se trabajó directamente con los registros de control del conversor analógico-digital.

Primero que todo se estableció la frecuencia de muestreo, la NCSDE exige al menos 3kHz, que con una señal de 60Hz que equivalen a 50 muestras por ciclo, pero debido a que luego estas muestras se introducen en un algoritmo para el cálculo de FFT, la cantidad de muestras debe ser una potencia de 2 (ejemplo: 2, 4, 8, 16, 32,...), se decidió trabajar con 64 muestras por ciclo, lo que equivale a un frecuencia de muestreo de 3840Hz.

Sin embargo, y a pesar de que el DSpic tiene la capacidad muestrear a 200kHz, éste posee un solo circuito de “sample and hold” por lo que adquiere por un solo canal a la vez y no varios de manera simultánea. Esto obligó a realizar la adquisición de manera multiplexada, lo cual introduce un desfase en la medición de las 6 señales.

Cabe destacar que el desfase se redujo considerablemente al configurar la frecuencia de muestreo en 200kHz, e introduciendo un retardo de 230μS para solo obtener 64 muestras de cada señal por ciclo, como se muestra en la **figura 3.2**.

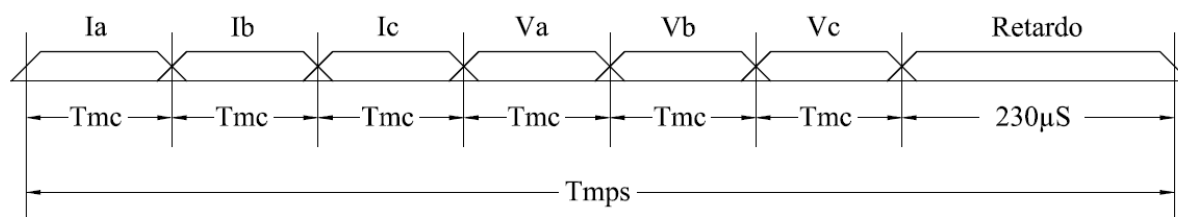


Figura 3.2 – Secuencia de muestreo de señales incluyendo retardo

Donde:

Tiempo de muestreo del conversor (T_{mc}) = $5\mu S = 1/200kHz$

Tiempo de muestreo por señal (T_{mps}) = $260\mu S = 1/3846,15Hz$



Capítulo III



Como se puede observar el máximo desfasaje es entre I_a y V_c , el cual es $25\mu S$, y si se lleva a grados eléctricos es de $0,54^\circ$ que comparado con 360° es despreciable.

- c) Obtener fecha y hora del reloj de tiempo real DS1307 a través de comunicación I2C:

Para la comunicación I2C se utilizó la librería de la Mikroelectronika, con la cual se inició el módulo de comunicación configurando la velocidad de transmisión a $100kHz$. Luego se inició la comunicación en modo de escritura para establecer la fecha y hora inicial escribiéndola directamente en los registros del reloj de tiempo real. Una vez configurada se puede obtener fecha y hora en cualquier momento configurando el modulo I2C en modo de lectura para leer los registros del DS1307

- d) Crear un archivo de texto en la memoria microSD y escribir en él:

Para lograr esta actividad se utilizó la librería de Mikrobasic especializada en manipulación de data en MMC (Multi Media Cards) y SD (Secure Disk), a través de comunicación SPI. También se recurrió a un ejemplo que ofrece la misma librería, el cual se adapto a las necesidades de la presente investigación, las cuales incluyen identificar si la tarjeta SD está conectada al DSPIC, formatear la tarjeta, crear el archivo de texto con su respectivo nombre (MUESTRAS.TXT), abrirlo para escritura y enviar la data al archivo.

Para enviar la data se le tuvo que hacer un tratamiento a cada muestra, que consiste en realizar un desglose de dígitos, para luego colocar a cada uno en una cadena de caracteres ASCII.

3. Implementar el programa principal que ensamble los subprogramas:

Aquí simplemente se tomaron los subprogramas anteriores y se empezaron a llamar según se fuesen necesitando, para ello se realizaron pruebas en vacío con el DSpic y los



periféricos conectados en un protoboard. Una de las observaciones de los investigadores fue que, a pesar de que el DSPIC está trabajando a casi 120MHz y el reloj de la comunicación SPI está trabajando su máxima capacidad, al DSPIC le está tomando aproximadamente 7 segundos almacenar en la memoria SD un ciclo de cada señal.

La consecuencia directa de lo anterior es que en vez de poder calcular 600 valores RMS cada 10 minutos por señal, solo se van poder calcular 86 y además de imposibilitar el cálculo de flicker, ya que las variaciones de tensión son entre 10 y 25Hz, las cuales son imposibles de medir adquiriendo un ciclo cada 7 segundos.

Para cargar el archivo .HEX generado por mikrobasic al DSPIC, se utilizó el programador IPROG de roso-control.

FASE V. Diseñar y construir el sistema de adquisición de las señales analógicas para su conversión a una señal digital.

Actividades:

1. *Determinar los periféricos que van a acompañar requiere DSPIC:*

Dadas las funciones que debe cumplir esta tarjeta son adquirir y almacenar con una referencia temporal, los periféricos con los que debe contar son:

- a) **MAX232:** el cual sirve de interface entre una señal RS232 que tiene tensión positiva y negativa ($\pm 10V$ aproximadamente), y una señal TTL que solo tiene tensión positiva (0V para nivel lógico bajo y 5V para nivel lógico alto), por lo tanto este chip se encarga de adaptar las señales entre los niveles lógicos TTL del DSPIC y los niveles RS232 de la computadora.
- b) **Reloj de tiempo real (DS1307):** el cual automáticamente, mantiene el tiempo y la fecha actual, incluyendo compensación para meses con menos de 31 días y saltos de



año. El DS1307 es un circuito integrado de 8 pines al que se le conecta un cristal de cuarzo estándar, de bajo costo, a 32.768kHz entre los pines 1 y 2 para proveer tiempo base exacto. Opcionalmente se le puede conectar al pin 3, baterías de respaldo de 3 volt, asegurando que se mantendrá el tiempo a la fecha aunque esté desconectada la fuente de tensión del circuito principal.

- c) **Memoria microSD:** en la cual se almacenan las muestras que adquiere el registrador, a pesar de no ir directamente en la tarjeta, ya que debe ser de fácil acceso del usuario, se debe dejar los pines para que se puedan conectar con el slot (adaptador de microSD) que va dispuesto en el panel frontal del equipo, además de necesitar de una tensión de 3,3V para poder funcionar de acuerdo con el esquema suministrado por la librería de Mikrobasic. Para estimar el volumen de la data generada por el equipo, primero se estableció la estructura del archivo y la cantidad de líneas de este. Como se explicó anteriormente el archivo generado por el prototipo está compuesto por los valores instantáneos de las 6 señales, con 64 muestras por ciclo, 86 ciclos cada 10 minutos y cada muestra tiene 4 caracteres ASCII (1 byte cada uno), se puede estimar un volumen de data para un máximo de una semana de aproximadamente 133MB, razón por la cual se utilizó una memoria de 256MB (La librería de Mikrobasic puede trabajar memorias hasta de 2GB).
- d) **Cristal de 7,37MHz:** para que el DSPIC30F6014A trabaje a 120MHz, es necesario colocar un cristal de 7,5MHz y activar en las palabras de configuración del .HEX con él multiplicador de frecuencia de PLLx16. Pero debido que no fue posible conseguirlo se trabajo con el más cercano, por lo que la frecuencia de operación real es de 117,92 MHz, la cual es muy cercana la velocidad máxima real.

2. *Ensamblar la tarjeta de adquisición:*

Para realizar el diseño de las pistas de esta tarjeta se recurrió al programa EAGLE, donde se procedió a crear el schematic ayudado con los esquemas de conexión brindados



Capítulo III



por la ayuda de mikrobasic, tanto para MAX232 como para la memoria SD, la conexión con el DS1307 se obtuvo de la hoja de datos del mismo.

Para la conexión con el DSPIC se realizó un tratamiento especial, ya que el encapsulado es de montaje superficial TQFP (Thin Quad Flat Pack), por lo que se compró ya soldado a una base, la cual se utiliza para conectarse a un módulo de desarrollo de la Microchip. Esta base posee unos agujeros través de los cuales se tiene acceso a los pines del DSPIC, dichos agujeros no son lo suficientemente grandes para los espaldines normales, por lo que se recurrió a terminales de resistencias de $\frac{1}{4}$ W.

Dada la importancia de esta tarjeta, se decidió hacerla con bakelita presensibilizada cuyo acabado es superior al de la fenólica, y de capa simple ya que tiene menor cantidad de pistas y elementos. En esta ocasión las pistas se imprimieron en una transparencia, debido a que la película fotosensible de la bakelita va proteger al cobre en las áreas donde la luz no llegue. Luego en un cuarto oscuro se extrajo la bakelita de su empaque, se colocó cuidadosamente la transparencia encima de la tarjeta, después con una lámpara se sometió a luz durante 10 minutos, una vez hecho y con la luz apagada de nuevo esto se sumergió en un líquido revelador para remover la película fotosensible en las áreas donde no se desea cobre y por último se sumergió el cloruro férrico para el acabado final.

Una vez terminadas las pistas, el procedimiento es el mismo que se siguió con la tarjeta de acondicionamiento, se le hicieron los agujeros y se soldaron los elementos cuidadosamente con estaño.

FASE VI. Implementar el software necesario para el posterior análisis de los datos recabados por el equipo registrador.

Actividades:

1. *Seleccionar el lenguaje de programación más óptimo para crear la interfaz con el microcontrolador y procesamiento de la información registrada:*



Dado que la facilidad de los investigadores con el lenguaje Visual Basic.NET se seleccionó dicho lenguaje de programación para el desarrollo del proyecto, y se usó como entorno de desarrollo Microsoft Visual Studio versión 9 debido a que posee las librerías necesarias para realizar la interfaz, tales como, comunicación serial, graficación y creación de archivos en formato PDF, además de la abundante ayuda disponible en internet relacionada con este entorno de desarrollo.

2. *Desarrollar bloques de programación según las actividades que se requieran (descarga de información registrada, procesamiento y visualización de datos, comunicación con el equipo):*

Para poder explicar esta actividad se tiene separar la interfaz en varias etapas:

Etapas 1: Comunicación de la interfaz con el equipo.

Para esta parte se colocaron dos comboboxes (Ver **figura 4.21**) uno para seleccionar el puerto de la computadora donde está conectado el cable serial, y el otro para seleccionar la duración de la campaña y un botón para enviar el tipo de campaña al equipo vía puerto serial. Para rellenar el contenido del combobox de los puertos se creó un ciclo automático donde se le asignaban uno por uno los puertos disponibles en la computadora, lo mismo se hizo con el combobox del tipo de campaña asignándosele 1 hora, 12 horas, 1 día y una semana respectivamente.

Mientras tanto el botón para enviar la información permanece inhabilitado, hasta que el usuario seleccione una opción en ambos comboboxes. Luego que se habilita este botón se procedió a escribir las instrucciones dentro del mismo para enviar el tipo de campaña seleccionada en el combobox, para este propósito se programó la interfaz de manera tal que envíe un carácter de prueba (un cero “0”) y luego el registrador se lo regrese vía serial, si el registrador manda el cero de vuelta se procede a enviar un número



dependiendo del tipo de campaña seleccionada en el combobox, como se presenta en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Caracteres asociados a las duraciones de Campaña

Campaña seleccionada	Carácter enviado al registrador
1 hora	1
12 horas	2
1 día	3
1 semana	4

Fuente: Propia

Si el mensaje llega con éxito al registrador, éste lo envía de regreso, de esta manera la interfaz se asegura que el equipo recibió el tipo de campaña a medir con éxito. Al concluir esta parte la interfaz envía un mensaje al usuario diciendo que el registrador se ha programado exitosamente con la campaña deseada.

Etapas 2: Análisis de la Campaña.

Esta parte es la encargada de procesar la data recolectada por el equipo, para ello se trabajo con botones y un combobox (Ver **figura 4.21**), uno de los botones (“Abrir campaña”) se programó para abrir un cuadro de diálogo que sirva de búsqueda del archivo generado por el registrador en la memoria SD y poder cargarlo a la interfaz. El combobox se colocó para que el usuario seleccionara el tipo de densidad de carga del municipio al que se le está haciendo la campaña de medición, con la finalidad de que la interfaz trabaje con la banda de tensión correcta al momento de evaluar la campaña de medición (Ver tabla 2.1).



Capítulo III



El segundo botón (“Procesar Campaña”) de esta etapa es donde residen la mayoría de los cálculos. A continuación se explicará las instrucciones que se colocaron en este botón:

- Tomar la data del archivo “MUESTRAS.TXT” creado por el registrador y en base a este crear archivos de texto con las señales separadas y ya transformadas a tensiones y corrientes instantáneas (Para conseguir las ecuaciones de transformación de la data generada por el conversor analógico digital se realizaron ensayos colocando voltímetros y amperímetros en paralelo con el registrador y en base a lo medido se dedujeron las ecuaciones en forma empírica). Los archivos generados son IABRUTO.TXT, IBBRUTO.TXT, ICBRUTO.TXT, VABRUTO.TXT, VBBRUTO.TXT, VCBRUTO.TXT. En adición a estos archivos también se crea un archivo solo con las fechas y horas (HORAS.TXT) de las muestras.
- Calcular los valores RMS por ciclo de las 6 señales de toda la campaña, tomando como base los archivos con los valores instantáneos y utilizando la ecuación 2.18 almacenarla en un archivo de texto dependiendo de la variable respectiva (IARMS.TXT, IBRMS.TXT, ICRMS.TXT, VARMS.TXT, VBRMS.TXT, VCRMS.TXT).
- Calcular los THD por ciclo de las 6 señales de toda la campaña, tomando como base los archivos con los valores instantáneos y utilizando la ecuación 2.14 almacenarla en un archivo de texto dependiendo de la variable respectiva (IATHD.TXT, IBTHD.TXT, ICTHD.TXT, VATHD.TXT, VBTHD.TXT, VCTHD.TXT).
- Calcular las potencias activas por ciclo de las 3 fases de toda la campaña, tomando como base los archivos con los valores instantáneos y utilizando la ecuación 2.20 almacenarla en un archivo de texto dependiendo de la variable respectiva (PA.TXT, PB.TXT, PC.TXT)
- Calcular los factores de potencia por ciclo de las 3 fases de toda la campaña, tomando como base los archivos con los valores instantáneos y utilizando la



ecuación 2.24 almacenarla en un archivo de texto dependiendo de la variable respectiva (FPA.TXT, FPB.TXT, FPC.TXT).

- Calcular las asimetrías por ciclo entre 3 corrientes y las asimetrías entre las 3 tensiones de toda la campaña, tomando como base los archivos con los valores instantáneos y utilizando la ecuación 2.29 almacenarla en un archivo de texto dependiendo de la variable respectiva (ASIMETRIAI.TXT, ASIMETRIAV.TXT).
- Calcular los promedios cada 10 minutos de cada una las variables anteriores y almacenarlos en un archivo con el nombre de la variable correspondiente (A excepción de la potencia que se le calcula el área bajo la curva por intervalo para obtener la energía).
- Tomar los promedios anteriores y utilizando la librería de graficación de de Visual Estudio se elaboran las gráficas y se muestran en las pestañas contiguas a la pestaña principal.

Etapas 3: Cálculo de Índices de Calidad y Emisión de Reporte.

En esta sección de la interfaz se colocó un campo para que el usuario introduzca energía total facturada en el mes de infracción, y un botón donde se llevan a los cálculos de de los índices de calidad de energía a través de la ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, los cuales se muestran al pulsar el botón “Calcular Índices”.

Para la emisión del reporte se colocó un botón en el cual en primera instancia se muestra una ventana de diálogo donde el usuario puede introducir los datos de Nombre de la Empresa Distribuidora, Dirección del Punto de Medición, Número de cuenta y Municipio. En la misma ventana de diálogo se colocó otro botón para que una vez el usuario haya introducido los datos del reporte pulse este botón y la interfaz proceda a tomar la gráficas generadas en la etapa anterior y utilizando la librería de visual estudio para crear archivos en formato PDF, genere el reporte donde se pueden visualizar los resultado de la campaña.



FASE VII. Ensamblar y calibrar el prototipo del equipo desarrollado.

Actividades:

- 1. Hacer pruebas, validar y afinar los parámetros necesarios, ya sea a nivel de hardware o software:*

En esta actividad se procedió a armar todas las partes del equipo para poder realizar las pruebas y detectar las posibles fallas.

Para este propósito se adquirió una caja de proyectos en donde se instalaron las tarjetas de acondicionamiento de las señales y la tarjeta de adquisición respectivamente. En esta caja también está dispuesto el panel de control para el usuario en el cual se cablearon las entradas y salidas de las tarjetas. De la tarjeta de acondicionamiento se extrajeron las tres entradas de tensión y la de neutro a través de unos cables, y se soldaron con cuatro conectores banana hembra fijados en el panel. Para las entradas de corriente se colocaron tres jacks de audio hembra.

De la tarjeta de adquisición de datos también se tomaron las entradas y salidas y se llevaron al panel de control (Ver **figura 4.15**), entre ellas se tienen:

- Slot para la memoria microSD en la cual se van a almacenar los datos.
- Suiche para iniciar la campaña de medición.
- Leds de señalización del equipo (Encendido, Adquiriendo, Fin de Campaña).
- Conector DB9 para comunicación serial.
- Botón pulsador de Reset para el Dspic.

Además de la conexión con las tarjetas también se colocó un suiche de dos polos para encender y apagar el equipo abriendo y cerrando el secundario del transformador de alimentación.



Capítulo III



2. Realizar pruebas en campo para observar el funcionamiento del prototipo:

Para realizar esta actividad se decidió implementar una campaña de medición de 1 hora de duración, con una carga trifásica de prueba elaborada por los investigadores, conformada por 3 bombillos incandescentes y tres dimmers para regular el valor RMS y el THD. La campaña se llevó a cabo en laboratorio de circuitos y mediciones utilizando la fuente trifásica y un analizador de parámetros eléctricos, para comparar las mediciones de del equipo con el analizador.

Adicionalmente se realizó una campaña de medición por el lapso de 1 día, dicha prueba se llevo a cabo en el laboratorio de Maquinas Eléctricas, con una carga resistiva trifásica variable de mayor consumo que la utilizada en la prueba anterior.



CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

A continuación se mencionan algunos trabajos de investigación relacionados con calidad de energía y otros tópicos necesarios para la elaboración del presente proyecto

En el Trabajo de Grado realizado por Andrés Puche y José Rojas titulado “Diseño y Construcción de un Instrumento Portátil de Registro y Análisis de Variables Eléctricas de Calidad de Energía” (Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela) del año 2007, se presenta el diseño e implementación de un equipo registrador monofásico que digitaliza las señales de la red. Además representa el punto de partida del presente proyecto.

En el Trabajo de Ascenso de Milagros Peña y José Raga titulado “Calidad de Energía en Sistemas Eléctricos” (Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela) del año 2002 se revisa el estado en el que se encontraban los diferentes parámetros de los sistemas eléctricos necesarios para la evaluación de la calidad del servicio eléctrico, considerando la reestructuración del sistema eléctrico venezolano. Se analizan las Normas de Calidad del Servicio Eléctrico tanto nacionales como internacionales y se revisan las campañas de medición realizadas por las empresas de distribución del servicio de electricidad para conocer el estado del sistema eléctrico en aquella fecha. De este trabajo se toman algunos conceptos teóricos asociados a calidad de energía para el desarrollo la presente investigación

En el Trabajo de Grado que lleva por título “Rediseño de un sistema de adquisición para señales de potencia” realizado por Isaías José Paris Leal (Universidad Simón Bolívar Sartenejas, Venezuela) del año 2005 se rediseña el sistema de adquisición de datos y se establece una nueva arquitectura basada en los componentes del prototipo previo, pero brindando mayor peso en el poder de control del microcontrolador, cargándolo con tareas



Capítulo II



que antes recaían en hardware adicional, luego de pruebas en la arquitectura y a los protocolos de comunicación, se procedió a realizar el diseño del circuito impreso del nuevo prototipo. De este trabajo se utilizan varios conceptos relacionados a programación y arquitectura de los microcontroladores.

En el Trabajo de Grado que lleva por nombre “Optimización del sistema de acondicionamiento de señales eléctricas de potencia” llevado a cabo por Wagner Ospino y Jonathan Eduardo (Universidad Simón Bolívar. Sartanejas, Venezuela) en el año 2003, se planteo la necesidad de modernizar las mediciones en el Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad Simón Bolívar, por lo que se diseñó un sistema de adquisición de datos cuyas características eran la portabilidad, capacidad de conectarse al computador, para el procesamiento posterior de datos. El proyecto está basado en la elaboración de una tarjeta de adquisición de datos, capaz de censar doce canales de manera simultánea. Estas señales son provenientes de sistemas de acondicionamiento de señales. De este trabajo se toman como referencia algunos elementos del sistema de acondicionamiento de de señales.

El Trabajo de Grado realizado por Octavio José Linares Bolívar titulado “Desarrollo de un prototipo para la medición y contabilización de energía basado en un DSP con capacidad de comunicación serial” (Universidad Simón Bolívar. Sartanejas, Venezuela) del 2006, trata sobre el diseño del prototipo de un dispositivo capaz de medir y contabilizar la energía proveniente de la línea, procesándola y transmitiéndola a los diversos puertos de salida. El prototipo consta de un módulo procesador digital de señales, que muestrea las señales de voltaje y corriente mediante un procesador digital de señales, las procesa y envía los resultados a un microcontrolador, quien los acondiciona para la trasmisión a los puertos de salida. De este trabajo se toman algunas directrices en lo que se refiere a comunicación y almacenamiento de data.

El Trabajo de Grado desarrollado por Silva G, Vanesa titulado “Apoyo técnico en el diseño y elaboración de una tarjeta de adquisición de datos para sistemas de potencia” (Universidad Simón Bolívar. Sartanejas, Venezuela) del año 2003, se basó en prestar apoyo



Capítulo II



técnico para el diseño e implementación de una tarjeta de adquisición de datos de potencia, haciendo énfasis en la elaboración del circuito impreso final del equipo. Este proyecto fue desarrollado en el Laboratorio de Conversión de Energía Eléctrica de la Universidad Simón Bolívar respondiendo a la necesidad de modernizar las mediciones, pues la tarjeta existente no cumplía con los requerimientos. De este trabajo se utilizan algunos elementos del sistema de acondicionamiento de señales.

El Trabajo de Grado realizado por Lixy Carrillo titulado “Construcción de un Multimedia Didáctico para las Prácticas del Laboratorio De Circuitos y Mediciones Eléctricas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo” (Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela) del año 2009, trata la construcción de un multimedia para selección e implementación de un analizador de potencia de tecnología numérica, está enmarcada dentro de la modalidad de Proyecto Factible, por representar una solución viable a una necesidad por parte de la Escuela de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. La población estuvo conformada por el Laboratorio de Circuitos y Mediciones Eléctricas de la Universidad de Carabobo, incluyendo los equipos que se encuentran en el mi pudieran ser adquiridos, se tomó una muestra intencional de los tres principales modelos de equipos de supervisión o medición de variables eléctricas disponibles en el mercado, a fin de seleccionar uno de ellos para el diseño de las prácticas elaborado bajo el software Flash Macromedia, representando una herramienta interactiva para el desarrollo de las prácticas de transformadores de instrumentación y medición de parámetros, además de contener el acceso al digital y al manual del mismo. De este trabajo se tomó el analizador de potencia para hacer una campaña de medición de prueba.

2.2 Bases teóricas y definición de términos básicos

La literatura referente a calidad de energía es muy amplia y abarca una gran cantidad de términos. Seguidamente se presentarán algunas definiciones básicas necesarias para el desarrollo de la investigación.



2.2.1 Definiciones principales referentes a calidad de energía

El término calidad de energía es aplicado normalmente a una gran variedad de fenómenos electromagnéticos presentes en un sistema eléctrico [6]. Sin embargo, la calidad de energía está principalmente definida por la calidad del servicio de la onda de tensión suministrada, la cual hace referencia a las características de su forma de onda y el cumplimiento de los estándares adoptados para efectos de su estudio, y que son de interés en el presente trabajo de investigación.

2.2.1.1 Nivel de tensión

En el nivel de tensión son consideradas las variaciones lentas de tensión, cuya duración es superior a 10 segundos y con variaciones porcentuales permitidas, con respecto al valor nominal, que van desde $\pm 5\%$ hasta un $\pm 10\%$ [4].

El nivel de tensión de un sistema está sujeto a variaciones que deben ser mantenidas bajo los márgenes establecidos en el punto 7 del artículo N° 3 de la NCSDE (Normas de Fiscalización de Empresas de Distribución de Electricidad). Los valores permitidos están clasificados según el nivel de tensión y la densidad por municipio, como lo muestra la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Variaciones porcentuales permitidas de los niveles de tensión, con respecto al valor de tensión nominal

Densidad del Municipio	Variaciones
Alta Tensión	+/- 5%
Media Tensión	+/- 6%
Baja Tensión – Muy Alta Densidad	+/- 6%
Baja Tensión – Alta Densidad	+/- 6%



Capítulo II



Densidad del Municipio	Variaciones
Baja Tensión – Mediana Densidad	+/- 8%
Baja Tensión – Baja Densidad	+/- 10%
Baja Tensión – Muy Baja Densidad	+/- 10%

Fuente: NCSDE

Los rangos de nivel de tensión nominales de baja, media y alta tensión, están definidos en el punto 5 del artículo N°3 de la norma, y se clasifican de la siguiente manera:

- ALTA TENSIÓN (Tensión $\geq$ 69 kV)
- MEDIA TENSIÓN (1 kV < Tensión < 69 kV)
- BAJA TENSIÓN (Tensión $\leq$ 1 kV)

En relación al nivel de tensión nominal, la norma establece unas herramientas para el análisis estadístico de las mediciones de los niveles de tensión. En el punto 8 artículo N° 3 se menciona el Indicador de Frecuencia Equivalente de Desviación de de Tensión, regida por una ecuación que utiliza los datos obtenidos en las campañas de medición, cuya información resultante es importante para la fiscalización del servicio eléctrico. A continuación en el punto 9 del artículo N° 3 se encuentra el establecimiento de los puntos de medición y la obligación del fiscalizador de suministrar el número de puntos de medición a la empresa de suministro eléctrico a la cual se quiere realizar el estudio de calidad de energía, como lo muestra la tabla 2.2

Tabla 2.2 Cantidad mínima de puntos de medición según la densidad del municipio

Densidad del Municipio	Cantidad Mínima de Puntos de Medición
Muy Alta	35



Capítulo II



Densidad del Municipio	Cantidad Mínima de Puntos de Medición
Alta	20
Mediana	10
Baja	8
Muy Baja	4

Fuente: NCSDE

La definición del indicador de Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión (FEDT) se encuentra en el punto 11 del artículo N° 3 de la norma. El FEDT se define como un valor que representa la proporción en que la tensión medida se sitúa fuera de los límites permitidos.

Para el control de la calidad del nivel de tensión se establecen dos procedimientos de evaluación:

a) Período De Permanencia del nivel de Tensión Fuera de la Banda Permitida en cada Medición:

Cuando en algún Punto de Medición se registren niveles de tensión fuera de la banda permitida superior al tres por ciento de los registros totales medidos en dicho punto ($FEDT > 3\%$), La Distribuidora será sancionada y estará en la obligación de solucionar el problema demostrándolo a través de una nueva medición, la cual deberá ser realizada en el referido punto y durante un tiempo mínimo de siete días [4].

Los indicadores de Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión (FEDT), Frecuencia Equivalente de Energía Suministrada fuera de la banda permitida de tensión (FEES) y Energía Entregada con Baja Calidad (EEBC), se calculan utilizando las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3):



Capítulo II



$$FEDT = \frac{\sum_{i=1}^n CRMFBPT_i}{CTRM} \times 100 \quad (2.1)$$

$$FEES = \frac{\sum_{i=1}^n ESFBP_i}{ETR} \times 100 \quad (2.2)$$

$$EEBC = \frac{(FEES \times FEDT \times ETF_{CT})}{10.000} \quad (2.3)$$

Donde:

- **FEDT:** Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión, expresada en porcentaje.
- **CRMFBPT:** Cantidad de registros de medición fuera de la banda permitida de tensión, en el Punto de Medición.
- **CTRM:** Cantidad total de registros de medición, en dicho punto.
- **n:** Número total de registros fuera de la banda permitida de tensión, en dicho punto.
- **FEES:** Frecuencia Equivalente de Energía Suministrada fuera de la banda permitida de tensión, expresada en porcentaje.
- **ESFBP:** Energía siniestrada fuera de la banda permitida de tensión, en dicho punto, expresada en kWh.
- **ETR:** Energía total registrada en dicho punto, expresada en kWh.
- **EEBC:** Energía entregada con baja calidad, expresada en kWh.
- **ET_{ct}:** Energía total facturada en el mes de infracción, a los usuarios conectados al centro de transformación asociado al Punto de Medición, expresada en kWh.

b) Cantidad de Registros de Medición fuera del límite admisible medidos en cada Municipio:

Cuando en algún municipio se registren niveles de tensión fuera de la banda permitida superior al tres por ciento de los registros totales medidos en dicho municipio ($FEDT > 3\%$), La Distribuidora será sancionada de conformidad con lo dispuesto en la Ley Orgánica de Servicio Eléctrico, su reglamento y demás Normas aplicables [4]. La **figura 2.1** muestra una distribución gaussiana de la banda permitida de tensión.

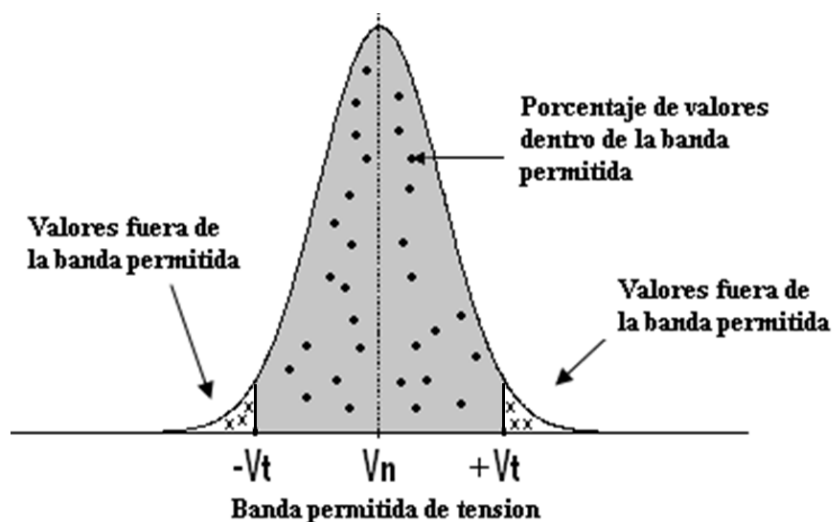


Figura 2.1 - Distribución gaussiana de la banda permitida de tensión

Donde:

- **Vn:** Tensión Nominal.
- **Vt:** Variaciones permitidas de los niveles de tensión.

La mayor cantidad de medidas de nivel de voltaje deberán estar dentro de la campana de Gauss, utilizándose en el cálculo del FEDT las medidas fuera de la banda de medición. Las medidas representadas por puntos se encuentran dentro de la banda permitida, nótese que están dentro de la campana de Gauss bajo los límites de tensión establecidos. Las representadas por cruces son las medidas que están fuera de la banda permitida por los límites establecidos. En caso de obtener un valor de FEDT > 3% deberán aplicarse las sanciones pertinentes.

Los indicadores de Frecuencia Equivalente de Desviación de Tensión (FEDT), Frecuencia Equivalente de Energía Suministrada fuera de la banda de tensión (FEES) y Energía Entregada con Baja Calidad (EEBC), se calcularán utilizando las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), respectivamente, y tomando en cuenta los registros de todos los puntos de medición presentes en el Municipio durante el Período de Medición.



2.2.1.2 Perturbaciones en la onda de tensión

Son fenómenos electromagnéticos que ocasionan alteraciones en la forma de onda de tensión. Algunas de las perturbaciones más comunes son: sags, swells, muescas, interrupciones, impulsos de tensión, sobretensiones, ruido eléctrico, desequilibrios de tensión, variaciones de frecuencia e interarmónicos [1].

2.2.1.2.1 Sags (Dips según norma IEC o Huecos de Tensión)

Son perturbaciones caracterizadas por presentar un descenso temporal del voltaje eficaz superior al 10 por ciento del valor nominal a la frecuencia de la red, con una duración que va de 8,3 milisegundos (0,5 ciclos) a un minuto. Los valores típicos varían entre 0,1 y 0,9 pu. Se debe principalmente a la conexión de grandes cargas y a las fallas del sistema de potencia. En la **figura 2.2** se observa la forma de onda característica en presencia de Sags [7].

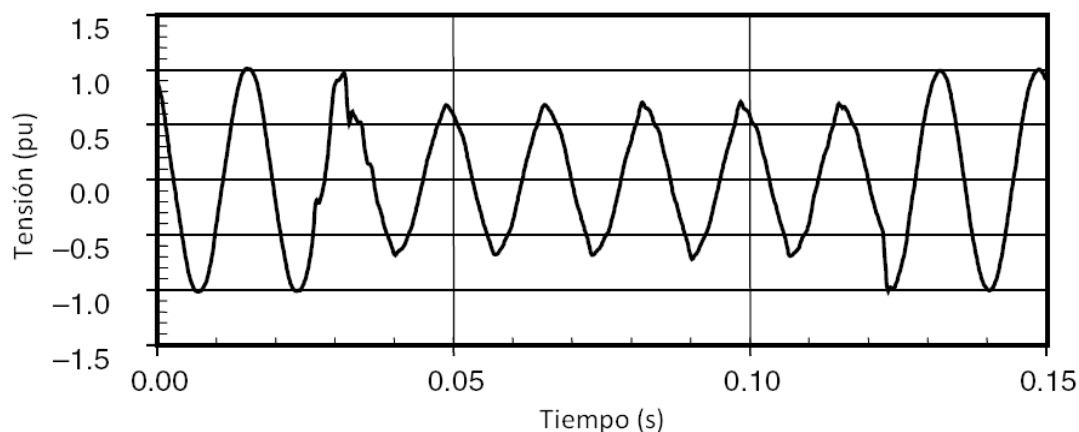


Figura 2.2 – Sags



2.2.1.2.2 Swells (Dilatación de voltaje)

Son perturbaciones que se caracterizan por un aumento temporal del voltaje eficaz que supera el 10 por ciento del valor nominal a la frecuencia de la red, con una duración de 8,3 milisegundos (0.5 ciclos) a 1 minuto. Los valores típicos para Swells varían entre 1,1 y 1,8 pu [7]. Se deben principalmente a la desconexión de grandes cargas y la energización de bancos de capacitores. La forma de onda de los Swells se observa en la **figura 2.3**.

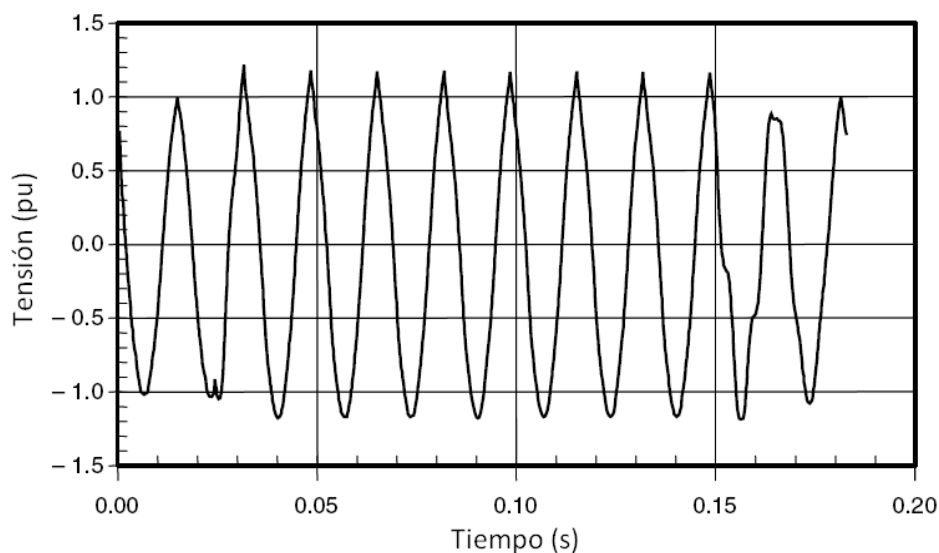


Figura 2.3 Swells

2.2.1.2.3 Muestras (Notching)

Son perturbaciones de voltaje periódicas y de corta duración (inferiores a 0,5 ciclos) y son producidas principalmente por la operación normal de dispositivos electrónicos de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Durante la conmutación se produce un cortocircuito momentáneo entre dos fases llevando el voltaje tan cerca de cero como lo permitan las impedancias del sistema [6]. La **figura 2.4** muestra un ejemplo de muescas.

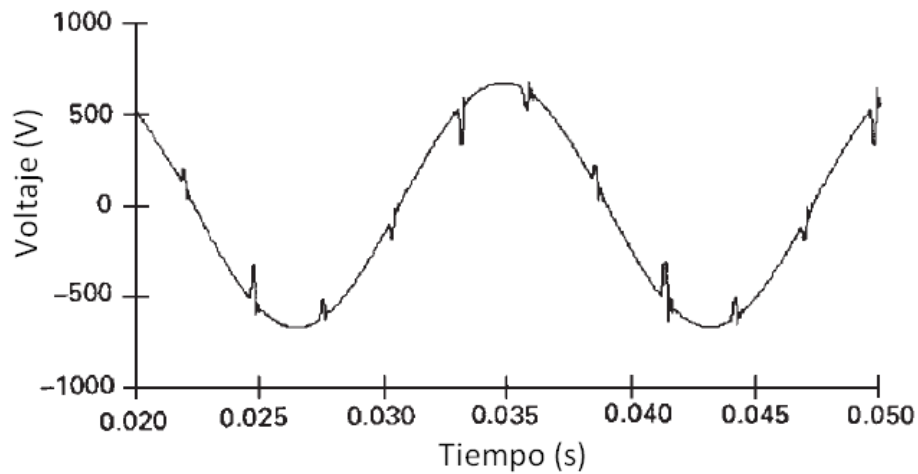


Figura 2.4 – Muescas

2.2.1.2.4 Interrupciones

Una interrupción se presenta cuando el suministro de voltaje o la intensidad de carga disminuyen a valores inferiores a 0,1 pu durante un tiempo inferior a un minuto. Pueden ser consecuencia de la operación del sistema de protecciones eléctricas. En la **figura 2.5** se observa una interrupción.

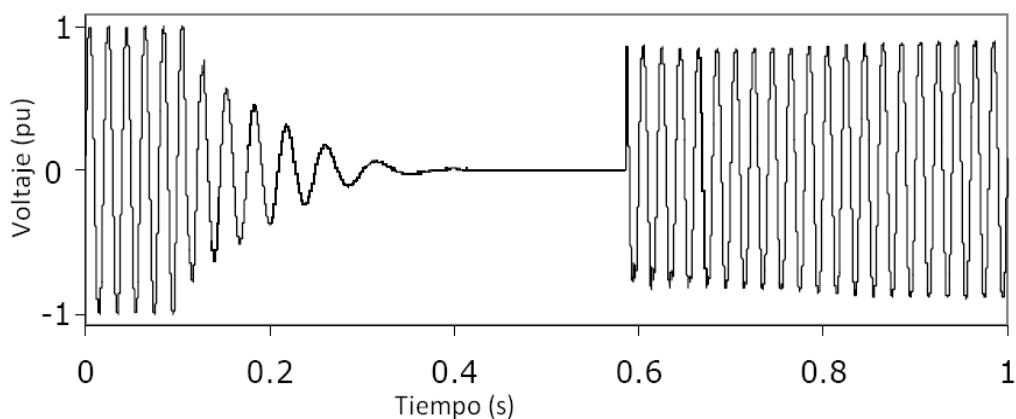


Figura 2.5 – Interrupciones



2.2.1.2.5 Impulsos de tensión

Es un fenómeno transitorio que se caracteriza por un incremento en la amplitud del voltaje, se presenta cuando se pasa de un régimen estacionario a otro. Son de corta duración, inferiores a 1ms y con frecuencias que van desde los kHz hasta los Mhz. La onda puede ser unidireccional, con polaridad positiva o negativa. Se deben principalmente a fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas y switcheo de grandes cargas. En la **figura 2.6** se observa un impulso de tensión.

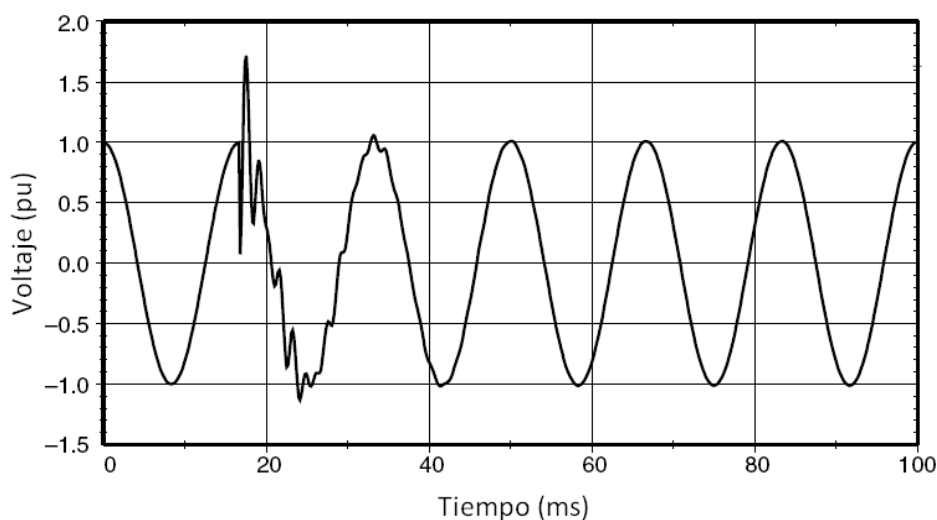


Figura 2.6 – Impulso de Tensión

2.2.1.2.6 Sobretensiones

Es una condición de voltaje elevado que se caracteriza por presentar una magnitud superior a la nominal durante más de un minuto. Los valores típicos de sobretensión pueden variar entre 1,1 y 1,2 pu. Surgen, principalmente, como consecuencia de la desconexión de grandes cargas. A continuación en la **figura 2.7** se observa una sobretensión [1].

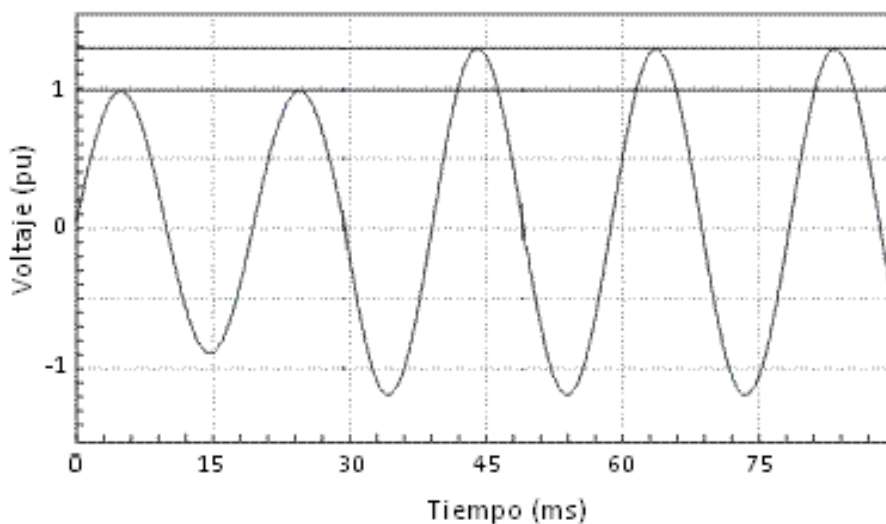


Figura 2.7 – Sobretensión

2.2.1.2.7 Ruido eléctrico

Es una señal no deseada, no necesariamente periódica, que se superpone a la señal de tensión y la distorsiona. El ruido es debido a operaciones de switcheo, dispositivos electrónicos y cargas con rectificadores de estado sólido. La distorsión armónica generada por el ruido eléctrico se observa en la **figura 2.8**.

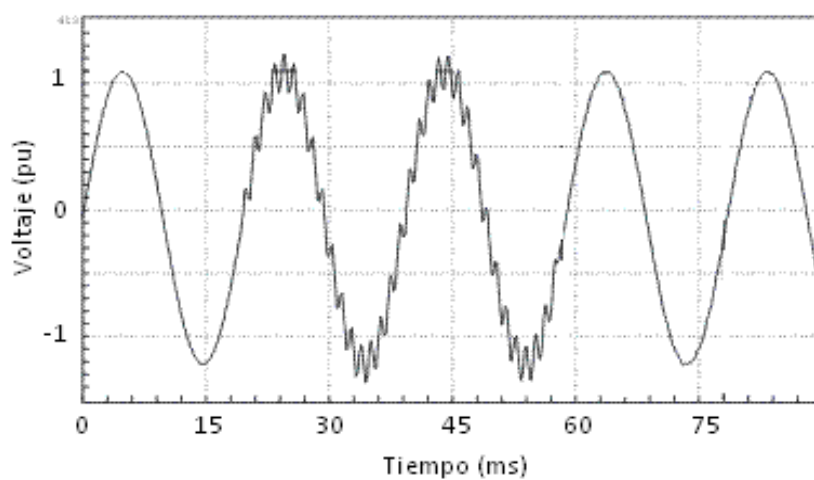


Figura 2.8 – Ruido eléctrico



2.2.1.2.8 Variaciones de frecuencia

En un sistema eléctrico existen variaciones de frecuencia cuando se produce una alteración del equilibrio entre carga y generación. La frecuencia, en un sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones, por minuto de los alternadores. Dado que la frecuencia es común a toda la red, todos los generadores acoplados a ella girarán de manera síncrona, a la misma velocidad angular eléctrica.

En condiciones normales de operación, la capacidad de generación conectada a una red es superior al consumo. No obstante, son posibles condiciones excepcionales en la que se produzca un desequilibrio importante entre la generación y la carga, dando lugar a una variación de frecuencia [1].

2.2.1.2.9 Interarmónicos

Son tensiones e intensidades con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Son ocasionados principalmente por convertidores de frecuencias estáticos, con motores asíncronos, dispositivos de arco y ciclo convertidores. Las señales de onda portadora de las líneas de transmisión son consideradas como interarmónicos [2]. En la **figura 2.9** se puede apreciar el fenómeno.

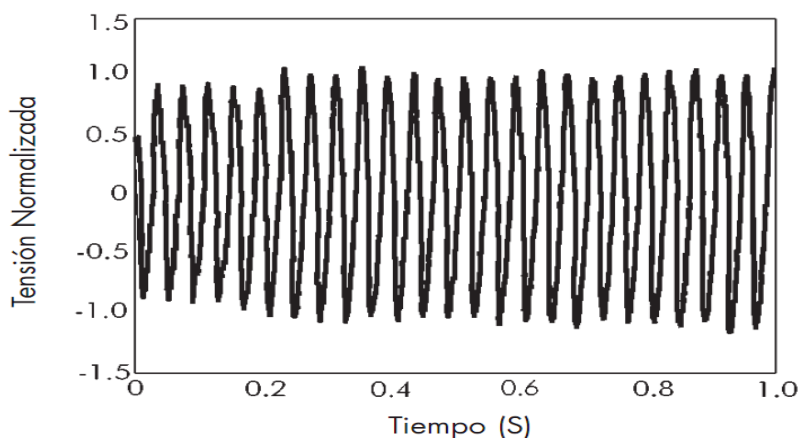


Figura 2.9 – Señal de tensión en presencia de interarmónicos



Capítulo II



En la tabla 2.3 se presentan, de manera resumida, las diferentes perturbaciones y sus características más importantes.

Tabla 2.3 Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos presentes en los sistemas de potencia, según IEEE Std 1159-1995

Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud de Voltaje Típica
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundo	Subida en 5 nS	< 50 nS	
1.1.2 Microsegundo	Subida 1μs	50 nS – 1 ms	
1.1.3 Milisegundo	Subida 0,1 ms	>1ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja frecuencia	< 5 kHz	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 – 500kHz	20 μs	0 – 8 pu
1.2.3 Alta frecuencia	0,5 – 5 MHz	5 μs	0 – 4 pu
2.0 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0,5 – 30 ciclos	0,1 - 0,9 pu
2.1.2 Swell		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupciones		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos – 3 s	0,1 - 0,9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporales			
2.3.1 Interruption		3 s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Sag		3 s – 1 min	0,1 - 0,9 pu
2.3.3 Swell		3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu



Capítulo II



Categorías	Contenido Espectral Típico	Duración Típica	Magnitud de Voltaje Típica
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1min	0,0 pu
3.2 Subtensiones		> 1min	0,8 – 0,9 pu
3.3 Sobre tensiones		> 1min	1,1 – 1,2 pu
4.0 Desbalance de tensiones		Régimen permanente	0,5 – 2%
5.0 Distorsión de la forma de onda			
5.1 Offset DC		Régimen permanente	0 – 0,1%
5.2 Armónicos	0 – 100 va. Armónica	Régimen permanente	0 – 20%
5.3 Interarmónicos	0 – 6kHz	Régimen permanente	0 – 2%
5.4 Muecas		Régimen permanente	
5.5 Ruido		Régimen permanente	0 – 1%
6.0 Fluctuaciones de tensión	< 25Hz	Intermitente	0,1 – 7%
7.0 Variaciones de frecuencia		< 10 s	

Según las NCSDE en Venezuela las perturbaciones de la onda de tensión que son objeto de control para medir la calidad del producto técnico son: las fluctuaciones rápidas de tensión (flicker) y la distorsión armónica [4].



2.2.1.3 Fluctuaciones rápidas de tensión

Son variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de un sistema de potencia que se mantienen durante un periodo definido. Tienen una duración que va desde varios milisegundos hasta unos 10 segundos y su amplitud no supera el ± 10 por ciento del valor nominal, es decir, dentro de un rango que varía entre 0,9 y 1,1 pu [1].

Frecuentemente se emplea el término flicker para referirse a una fluctuación rápida de tensión, pero es importante no confundir los términos. El flicker no es una fluctuación, es un efecto de las fluctuaciones rápidas de tensión en la **figura 2.10** se observa la fluctuación rápida de tensión

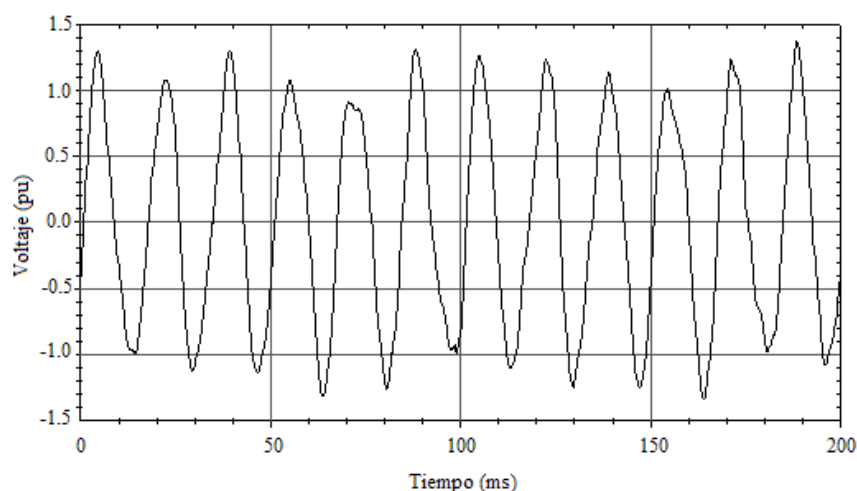


Figura 2.10 – Fluctuación rápida de tensión

2.2.1.4 Flicker

Es la percepción de la variación de la luminosidad de la lámpara, que es percibida por el ojo humano como un parpadeo. Es ocasionado por variaciones rápidas o fluctuaciones de tensión en la red de la alimentación eléctrica y origina en quien lo percibe una sensación desagradable.

El flicker depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan. Estas oscilan entre 0,5 Hz y los 30 Hz de frecuencia.

La IEC ha elaborado un criterio de evaluación de Flicker y emplea un medidor que permite conocer el nivel de sensación que experimenta una persona, es decir, la intensidad de la molestia que produce al observador, este medidor se conoce como Flickermetro. Dicho medidor emplea un algoritmo que traduce las fluctuaciones eléctricas en las sensaciones equivalentes que serían percibidas por el observador. Se basa en un modelo perceptivo del sistema sensorial del cerebro y el ojo humano. El diagrama de bloques de dicho algoritmo se puede apreciar en la **figura 2.11**.

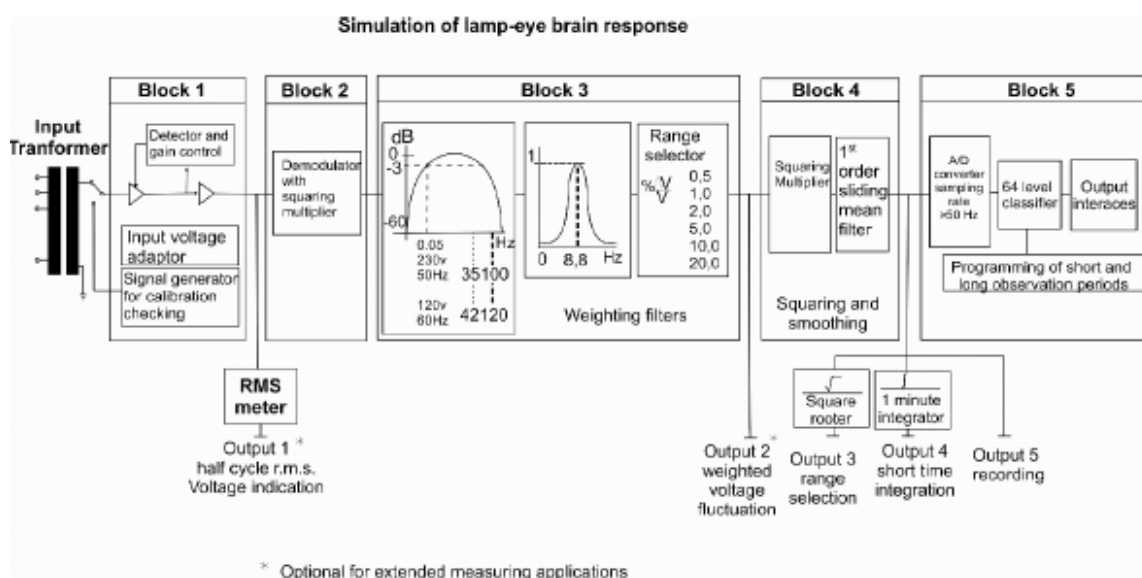


Figura 2.11 - Diagrama del bloques del Flickermetro

Hay dos índices que son empleados para evaluar la severidad del Flicker:

- **Pst** (índice de percepción de corta duración): Evalúa la severidad del Flicker en períodos cortos de tiempo, con intervalos de observación de 10 minutos el valor de Pst se expresa en unidades de p.u. de modo que para valores de Pst superiores a 1 se



Capítulo II



considera que el flicker es perceptible y afecta a la visión. El Pst se calcula a través de la ecuación (2.4) [1].

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,065P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.4)$$

Donde:

Pst: Índice de percepción de corta duración.

P_{0,1}, P₁, P₃, P₁₀ y P₅₀: Niveles de Flicker excedidos en 0,1; 1; 3; 10 y 50% del tiempo de medición.

- **Plt** (índice de percepción de larga duración): Evalúa la severidad del Flicker a largo plazo, con intervalos de observación de dos horas. Se calcula a partir de doce valores consecutivos de Pst de acuerdo con la ecuación (2.5) [1].

$$P_{lt} = \frac{1}{12} \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3} \quad (2.5)$$

Donde:

P_{lt}: Índice de percepción de larga duración.

P_{lti}: Índice de percepción de corta duración.

En Venezuela la NCSDE define el nivel de referencia para fluctuaciones de tensión y se establece mediante el índice de Severidad (Pst) de la fluctuación rápida de tensión de corta duración, el cual no debe sobre pasar el valor Pst = 1, definido como el umbral de irritabilidad asociado a la fluctuación máxima de luminancia que puede ser soportada sin molestia. Por lo tanto, el valor del Pst admisible para puntos de suministro de redes de baja, media y alta Tensión, no puede exceder el cinco por ciento del Período de Medición. Estas mediciones se realizarán en forma simultánea con las de niveles de tensión y las de distorsión armónica.



Para la fiscalización de la fluctuación rápida de tensión, se medirá el índice de severidad presente en los puntos de suministro seleccionados de forma aleatoria en el municipio para campañas de medición [4].

2.2.1.5 Distorsión armónica

Los armónicos son tensiones o corrientes con frecuencias de valores múltiplos enteros de la frecuencia normalizada para un sistema de potencia. En el caso de Venezuela la frecuencia nominal es de 60Hz. Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la frecuencia fundamental y los armónicos. La distorsión armónica se origina debido a la característica no lineal de los equipos y cargas del sistema de potencia.

Los niveles de distorsión armónica están definidos por el espectro de frecuencias completo con magnitudes y ángulos de fase de cada una de las componentes armónicas individuales. Es común usar una única cantidad, llamada Distorsión Armónica Total o THD (Total Harmonic Distortion), para cuantificar el valor efectivo de la distorsión armónica [6]. En la **figura 2.12** se observa una forma de onda afectada por distorsión armónica.

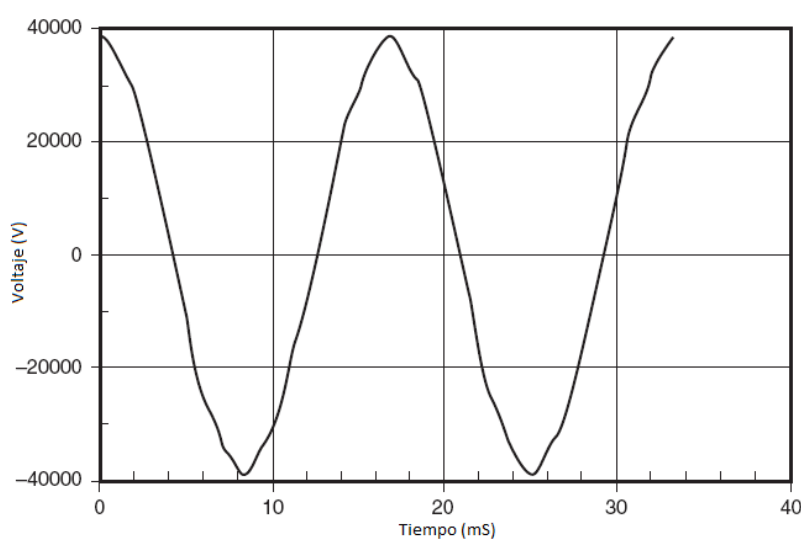


Figura 2.12 – Distorsión armónica



Capítulo II



Así mismo, aparecen en las redes otros componentes de la onda de tensión conocidos como interarmónicos. Se presentan a ciertas frecuencias como en forma de espectro de ancho de banda y su influencia no es significativa, por lo tanto no se les toma en cuenta.

En Venezuela para la fiscalización de la distorsión armónica, se medirá la Tasa de Distorsión Total (TDT) de Tensiones Armónicas (equivalente al THD) presentes en los puntos de Medición, seleccionados de forma aleatoria, para las Campañas de Medición. Las mediciones de distorsión armónica se realizan en forma simultánea con las de niveles tensión y las fluctuaciones rápidas de tensión.

La Tasa de Distorsión Total de Tensiones Armónicas se calcula por medio de la ecuación (2.6), según IEEE [8].

$$TDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

Donde:

TDT: La Tasa de Distorsión Total.

U_h : Amplitud de la tensión de la armónica de orden h .

U_1 : Amplitud de la tensión fundamental.

h : Armónica considerada.

Las amplitudes de los componentes armónicos se calculan a partir de la Transformada Discreta de Fourier o DFT (Discrete Fourier Transform), y son obtenidos en el dominio de la frecuencia.



2.2.1.6 Transformada Discreta de Fourier o DFT (Discrete Fourier Transform)

La Transformada Discreta de Fourier (DFT del inglés Discrete Fourier Transform) es el equivalente discreto de la Transformada de Fourier donde se ha transformado la variable continua 't' por la variable discreta 'nTs' siendo 'Ts' el período de muestreo. La Transformada de Fourier de una señal analógica x(t) se obtiene mediante la siguiente ecuación (2.7):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.7)$$

Donde:

X(ω): Transformada de Fourier.

x(t): Señal Analógica.

La Transformada Discreta de Fourier es un método muy eficiente para determinar el espectro en frecuencia de una señal. Permite convertir una secuencia de valores en el dominio del tiempo a una secuencia de valores equivalente en el dominio de la frecuencia, mediante la ecuación (2.8). La Inversa de la Transformada Discreta de Fourier (IDFT) realiza el proceso contrario según la ecuación (2.9). A continuación se muestran el par de ecuaciones de la DFT:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W^{nk} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.8)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \cdot W^{-nk} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.9)$$

Donde:

X(k): Transformada de Fourier Discreta.

x(n): Señal Discreta.

W: Factores Twiddle.



Capítulo II



Los factores Twiddle son constantes y se definen en la ecuación (2.9).

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad (2.10)$$

Observar que 'W' es una función de longitud N, por ello, también suele expresarse como W_n .

El inconveniente de realizar algoritmos que implementen tal cual estas fórmulas es la cantidad de tiempo requerido para computar la salida. Esto es debido a que los índices k y n deben variar de 0 a N-1 para conseguir el rango de salida completo y, por lo tanto, se deben realizar N^2 operaciones [9].

2.2.1.7 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Aplicando la fórmula (2.8) de la Transformada Discreta de Fourier para obtener $X(k)$; de un 'k' determinado requiere aproximadamente N sumas complejas y N productos complejos, sustituyendo se obtiene la ecuación (2.11):

$$X(k) = x(0) + x(1) \cdot W^k + x(2) \cdot W^{2k} + x(3) \cdot W^{3k} + \dots + x(N-1) \cdot W^{(N-1)k} \quad (2.11)$$

Para $k = 0, 1, \dots, N-1$. Si lo que se desea es obtener $X(0), X(1), \dots, X(N-1)$ entonces se necesitarán un total de aproximadamente N^2 sumas complejas y N^2 productos complejos.

Esto quiere decir que los requerimientos computacionales de la DFT pueden ser excesivos especialmente si el tamaño de N es grande.

La FFT aprovecha la periodicidad y simetría del factor Twiddle 'W' para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier.



Capítulo II



La periodicidad del factor Twiddle ‘W’ se define con la ecuación (2.12):

$$W^k = W^{k+N} \quad (2.12)$$

Y la simetría de dicho factor con la ecuación (2.13)

$$W^k = -W^{k+N/2} \quad (2.13)$$

La FFT descompone la DFT de N puntos en transformadas más pequeñas. Una DFT de N puntos es descompuesta en dos DFT's de (N/2) puntos. Cada DFT de (N/2) puntos se descompone a su vez en dos DFT's de (N/4) puntos y así sucesivamente. Al final de la descomposición se obtienen (N/2) DFT's de 2 puntos cada una. La transformada más pequeña viene determinada por la base de la FFT. Para una FFT de base 2, N debe ser una potencia de 2 y la transformada más pequeña es la DFT de 2 puntos. Para implementar la FFT existen dos procedimientos: diezmado en frecuencia (DIF del inglés Decimation In Frequency) y diezmado en el tiempo (DIT del inglés Decimation In Time) [9].

2.2.1.8 Distorsión armónica total de la corriente (THDi)

Es un índice usado para medir la distorsión de una onda periódica de corriente, con respecto a una onda sinusoidal de frecuencia fundamental. Este índice se obtiene de la relación entre la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor r.m.s. de cada armónico y el valor r.m.s. de la fundamental [8]. La THDi se obtiene a través de la ecuación (2.14).

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_H^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.14)$$

Donde:

THDi: Distorsión Armónica Total de la Corriente.

I_H: Valor individual de cada componente de corriente.



I_1 : Valor de frecuencia fundamental.

h : Orden del armónico.

2.2.1.9 Frecuencia de Nyquist

La frecuencia de muestreo mínima necesaria para la representación exacta de una señal, debe ser mayor al doble de la que tiene la componente de más alta frecuencia, como se observa en la expresión (2.15)

$$f_m > 2f_0 \quad (2.15)$$

Donde:

f_m : Frecuencia de muestreo.

f_0 : Componente de más alta frecuencia.

2.2.1.10 Relación de Parseval

Demuestra que la transformada de Fourier es unitaria; es decir, que la suma del cuadrado de una función es igual a la suma del cuadrado de su transformada. La interpretación de este teorema es que la energía total de una señal $x(t)$ es igual a la energía total de su transformada de Fourier $X(f)$ a lo largo de todas sus componentes frecuenciales. La relación de Parseval se observa en la ecuación (2.16).

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \quad (2.16)$$

Donde:

$x[n]$: Señal discreta en tiempo.

$X[k]$: Transformada discreta de Fourier de $x[n]$.

N : Número de muestras.



2.2.1.11 Distorsión por muestreo

La distorsión por muestro también conocida como “aliasing” causa la generación de señales falsas dentro del rango de frecuencia de interés que no pueden distinguirse de la información real y a raíz de esto, pueden ocurrir errores serios de interpretación de los datos. El “aliasing” es generado por una rata de muestreo insuficiente [1].

2.2.1.12 Efecto Leakage

Consiste en que las componentes originales de la señal se desplazan a nuevas componentes. Para evitarlo, se debe muestrear un número entero de períodos. Puede ocurrir que no se conoce el período de la señal de la cual se quiere calcular la DFT. En este caso se muestrea la señal de duración lo más larga posible. De esta forma, se reduce el leakage y el espacio entre frecuencias, obteniéndose una buena estimación del espectro original.

2.2.1.13 Valor r.m.s. verdadero (true r.m.s.)

Los instrumentos analógicos tradicionales calculan el valor r.m.s. considerando ondas sinusoidales puras, ya que, no toman en cuenta el efecto de las cargas no lineales y su calibración se realiza a través del máximo valor dividido entre raíz de dos; empleando la ecuación (2.17).

$$V_{r.m.s.} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (2.17)$$

Donde:

$V_{r.m.s.}$: Valor medio cuadrático (root mean square)

$V_{\max}$: Valor máximo.



Capítulo II



Para los medidores digitales el valor r.m.s. no es natural, por lo que se determina a través del valor medio de la señal rectificada multiplicada por $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$. Este valor toma nombre de la señal r.m.s. medio (r.m.s. mean) en los medidores digitales que miden sinusoidales puras. El valor r.m.s. para señales sinusoidales se puede calcular por medio de la ecuación (2.18).

$$V_{r.m.s_medio} = \frac{\sum |X_i|}{N} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

Donde:

$V_{r.m.s_medio}$: Valor r.m.s. medido a partir de la señal rectificada.

X_i : Valor enésimo.

N : Numero de muestras.

En la actualidad los medidores digitales deben tomar en cuenta que las señales no son sinusoidales, esto debido, principalmente, a la presencia de cargas no lineales. Por lo dicho anteriormente nace la necesidad de calcular el verdadero valor r.m.s., dicho valor se conoce con el nombre de r.m.s. verdadero (true r.m.s.) y se calcula a través de la ecuación (2.19).

$$V_{verdadero_r.m.s.} = \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{N}} \quad (2.19)$$

Donde:

$V_{verdadero_r.m.s.}$: Valor r.m.s. verdadero de la señal.

X_i : Valor pésimo muestreado.

N : numero de muestras.



2.2.1.14 Cálculo de la potencia activa

En sistemas digitales el cálculo de la potencia activa se deduce a partir de la ecuación (2.20), sin importar la distorsión armónica contenida en las señales de voltaje y corriente [1].

$$P_{activa} = \frac{\sum_N [V] \cdot [I]}{N} \quad (2.20)$$

Donde:

P_{activa}: potencia activa.

V: Señal de tensión.

I: Señal de corriente.

N: Número de muestras.

Otra forma válida de calcular la potencia activa es a través de la ecuación (2.21) que es simplemente la derivada de la energía.

$$P_{activa} = \frac{dw}{dt} \quad (2.21)$$

2.2.1.15 Cálculo de Potencia Aparente

Para la medición de potencia aparente a partir de señales no sinusoidales no existe una única definición, eso sí, se sabe con seguridad que para señales sinusoidales puras la potencia aparente puede ser expresada como $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Para condiciones no sinusoidales la potencia aparente puede ser expresada a través de la ecuación (2.22).

$$S = \sqrt{\sum_n V_n^2 \cdot \sum_n I_n^2} \quad (2.22)$$



Donde:

S: Potencia Aparente.

V_n: Componente armónico de tensión enésimo.

I_n: Componente armónico de corriente enésimo.

2.2.1.16 Potencia de distorsión

Debido a que el triángulo de potencia no se satisface, es necesario redefinir la relación entre potencia activa, reactiva y aparente introduciendo un factor conocido como *potencia de distorsión* (D). La potencia de distorsión es cero si no existen armónicos presentes en la señales. La relación entre las potencias se puede observar en la expresión (2.23).

$$S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2 \quad (2.23)$$

En la **figura 2.13** se observa el triángulo de potencia y la relación existente entre las distintas potencias cuando se encuentran armónicos presentes en la señales [1].

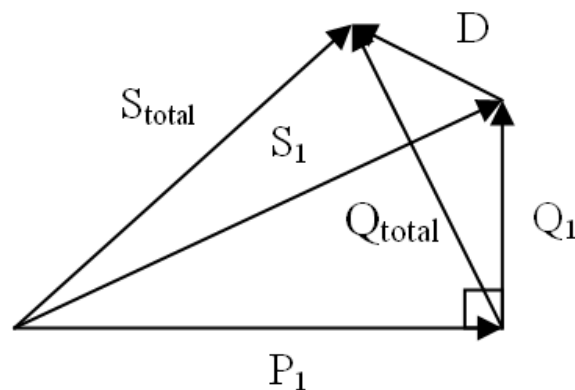


Figura 2.13 – Triangulo de Potencia y potencia de distorsión



2.2.1.17 Factor de Potencia

El factor de potencia se puede calcular por medio de la ecuación (2.24), independientemente de la naturaleza de la carga.

$$Fp = \frac{P}{S} \quad (2.24)$$

Donde:

Fp: Factor de Potencia.

P: Potencia Activa.

S: Potencia Aparente.

Así como la frecuencia fundamental la potencia posee su componente de potencia activa y reactiva, a alta frecuencia las corrientes armónicas generan también potencia real e imaginaria las cuales causan un aumento de la potencia aparente haciendo que el factor de potencia sea aun peor, a consecuencia de la distorsión armónica. En la ecuación (2.25), se expresa el factor de potencia en función aproximada de la Distorsión Armónica Total (THD), donde a mayor es la distorsión peor es el factor de potencia. Es de resaltar que esta ecuación es resultado de una demostración matemática, donde la principal premisa es que cualquier corriente posee una componente real e imaginaria [1].

$$Fp = \sqrt{\frac{1}{THDi^2 + 1}} \quad (2.25)$$

Donde:

Fp: Factor de Potencia.

THDi: Distorsión Armónica Total de la Corriente.



Capítulo II



En la tabla 2.4 se presenta un resumen de las características más importantes de las perturbaciones que afectan la onda de tensión.

Tabla 2.4 Características típica de las perturbaciones que afectan la forma de onda de tensión

Tipo de perturbación	Duración	Frecuencias Características	Localización Típica	Causas
Sags/Swells	Transitoria	Componentes de baja frecuencia	Sistemas mallados o sistemas radiales alimentados por sistemas radiales	Fallas remotas
Impulsos de tensión	Transitoria	Componentes de alta frecuencia	Sistemas sensibles a las descargas atmosféricas	Operaciones de maniobra y descargas atmosféricas
Armónicos	Permanente	Generalmente enteros impares, como el armónico tercero, quinto, séptimo, y noveno	Redes eléctricas comunes	Funcionamiento normal de cargas no lineales
Ruido eléctrico	Transitoria/ Permanente	Altas Frecuencias	Muchos sistemas de corriente alterna	Aterramiento inapropiado
Desequilibrios de tensión	Permanente	Frecuencia del sistema de potencia	Sistemas trifásicos	Cargas desbalanceadas, tierra inapropiada



Tipo de perturbación	Duración	Frecuencias Características	Localización Típica	Causas
Muestras	Permanente	Altas Frecuencias	Circuitos inductivos que emplean interruptores de estado sólido	Variadores de velocidad de motores

2.2.1.18 Componentes Simétricas

El método de las componentes simétricas aplica el concepto de descomponer el sistema desequilibrado en sistemas equilibrados. Si se tiene tres sistemas simétricos de distinta secuencia. Puede verse en la **figura 2.14** que la suma vectorial fase a fase de los mismos concluye en un sistema desequilibrado.

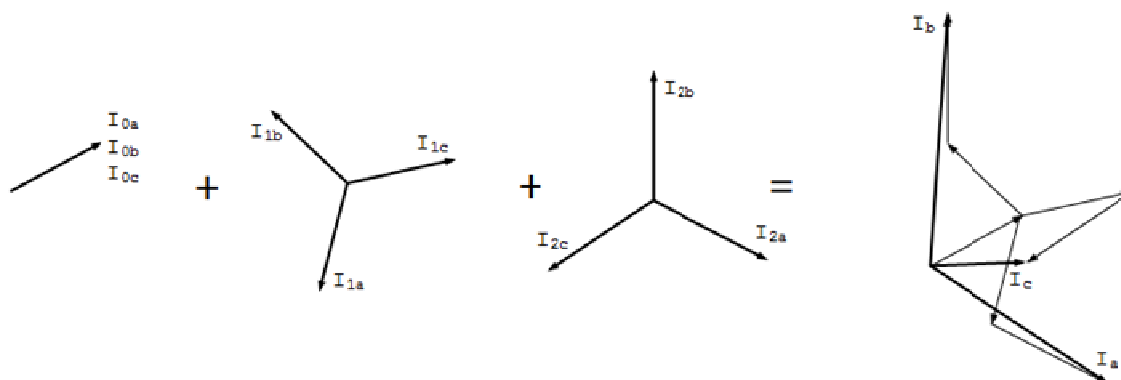


Figura 2.14 – Componentes Simétricas

La teoría de las componentes simétricas dice que, para sistemas lineales, la recíproca es válida, siendo posible descomponer cualquier sistema desequilibrado en un conjunto de sistemas equilibrados de distintas secuencias.

Las ecuaciones (2.26), (2.27) y (2.28) indican como obtener las componentes simétricas de un sistema trifásico desbalanceado.



$$I_{1a} = (I_a + aI_b + a^2I_c)/3 \quad (2.26)$$

$$I_{2a} = (I_a + a^2I_b + aI_c)/3 \quad (2.27)$$

$$I_0 = (I_a + I_b + I_c)/3 \quad (2.28)$$

Siendo “a” un operador equivalente a $e^{j2\pi/3}$ [10].

2.2.1.19 Asimetría (Desbalances de tensión)

Un sistema de potencia trifásico se define como asimétrico o desbalanceado cuando los módulos de la componente fundamental de las tensiones o corrientes no son iguales y/o cuando los ángulos de desfase entre las tensiones no son iguales [11].

La correcta cuantificación del desbalance de tensiones y/o corrientes en un sistema trifásico, se realiza mediante el empleo del método de componentes simétricas, y se define como la relación entre la componente de secuencia negativa y positiva, expresado en por ciento [12], como se indica en la ecuación (2.29).

$$u = \frac{U_2}{U_1} \times 100 \quad (2.29)$$

2.2.2 Los equipos medidores de calidad de energía

Los equipos utilizados para medir fenómenos electromagnéticos pueden ser tan simples como unos voltímetros analógicos o tan sofisticados como un analizador de espectro. Es necesario conocer las capacidades y limitaciones de los distintos equipos de medición y de esta forma seleccionar el equipo más adecuado a las exigencias del fenómeno que se desea medir. A continuación se presenta una breve reseña de cómo han evolucionado los equipos medidores de calidad de energía desde los más antiguos hasta los de tecnologías más recientes.



Capítulo II



El voltímetro analógico electromecánico es uno de los equipos más antiguos. Una vez seleccionada la escala, la medida se lee directamente sobre una escala analógica. Las medidas realizadas con este tipo de instrumento requieren del conocimiento previo de la forma de onda a la cual se le realiza la medida, debido a que las escalas están calibradas basándose en formas de ondas sinusoidales. Si el voltaje medido no tiene una forma de onda sinusoidal, la lectura de voltaje no es correcta.

Más adelante a final de la década de los treinta aparecen los osciloscopios, los cuales diagraman una representación visual de la forma de onda y dan paso al muestreo de señales de forma simultánea. Con estos equipos es posible variar la escala del tiempo y la amplitud de la señal medida, de esta manera se puede apreciar visualmente la presencia de perturbaciones en la forma de onda. Los primeros osciloscopios tenían la gran desventaja de no poseer memoria para registrar los eventos medidos; actualmente algunos osciloscopios tienen la capacidad de registrar en memoria ciertos eventos, aunque no se emplean para medir fenómenos de calidad de energía.

Luego aparecen los primeros equipos electromecánicos, donde el monitoreo continuo era la tarea principal. Estos medidores incluían equipos de impresión para registrar los eventos o variaciones eléctricas. Con la llegada de las computadoras se amplían las prestaciones de estos equipos principalmente en lo referente al almacenamiento de información y aplicaciones matemáticas; sin embargo las señales eléctricas no pueden ser medidas directamente por una computadora y requieren de elementos de transducción para este tipo de señales. De esta manera aparecen los equipos electrónicos registradores de calidad de energía.

Los primeros intentos en el diseño de medidores electrónicos de energía obtenían potencia de multiplicar la corriente y voltaje en el dominio analógico, pero la linealidad con respecto a la temperatura y el tiempo produjeron resultados inferiores a los obtenidos con medidores electromecánicos.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se procederá a describir detalladamente los resultados de la presente investigación, los cuales se dividen en:

- Hardware del registrador
- Software del DSPIC
- Interfaz de Usuario del registrador
- Campaña de prueba
- Manual de usuario

4.1 Hardware del registrador

El hardware del registrador está compuesto principalmente de dos tarjetas, una para el acondicionamiento de las señales, y otra para adquisición y almacenamiento de la data. Para complementar a estas tarjetas está la caja de proyectos dentro de la cual ellas van ubicadas y que además posee el panel de control para el usuario. Adicionalmente están las pinzas amperimétricas que captan la señal de corriente y por último la caja que contiene al transformador de alimentación. A continuación se describirán cada una de estas partes.

4.1.1 Tarjeta de Acondicionamiento de las señales

La función de esta tarjeta es tomar las señales de la red eléctrica a medir, y convertirlas en señales que el conversor analógico-digital pueda muestrear, es decir, señales que no se salgan de la banda de 0-5V. Para ello cuenta con 6 canales: tres para las señales de tensión y tres para las de corriente.



4.1.1.1 Acondicionamiento de las señales de tensión

El diseño esquemático del circuito de acondicionamiento por canal de tensión se puede observar en la **figura 4.1**.

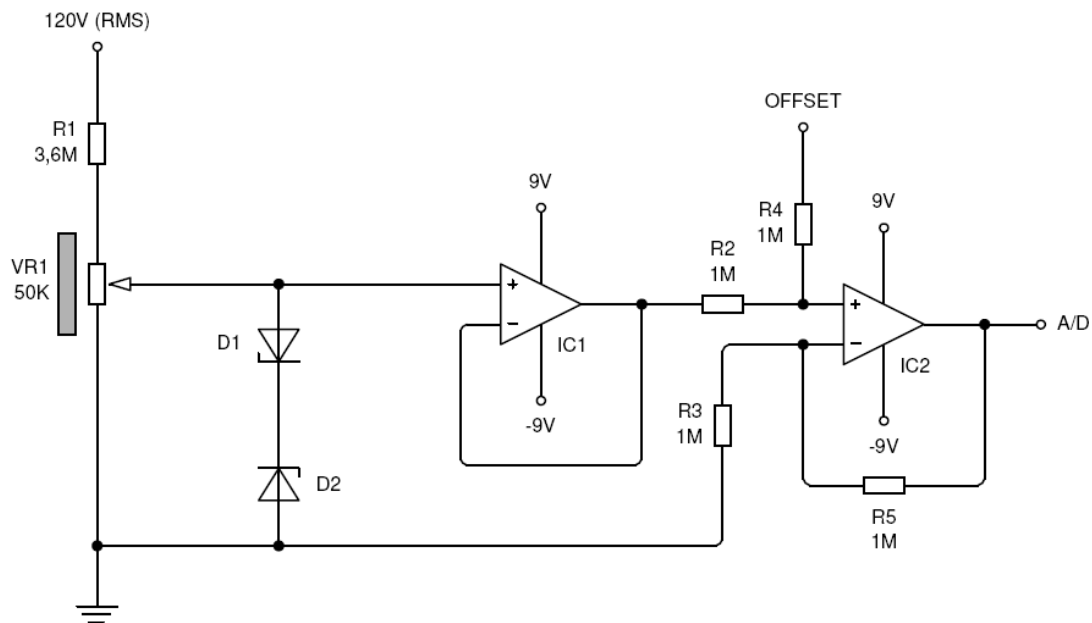


Figura 4.1 - Canal de acondicionamiento de la señal de tensión

En la primera etapa del circuito se puede observar el divisor de tensión, el cual está compuesto por una resistencia R1 de $3,6\text{M}\Omega$ y un trimmer VR1 de $50\text{k}\Omega$, estos valores garantizan que valor pico de la señal de salida del divisor no exceda $1,37\%$ de la señal de entrada, que para un valor pico de $169,7\text{V}$ (120V RMS) lo reduce a $2,32\text{V}$.

La etapa siguiente está constituida de dos diodos zener los cuales garantizan que el valor pico-pico de la salida del divisor de tensión no exceda los 10V , encendiendo uno de los diodos (D1) en directo y el otro (D2) en inverso para el caso del lóbulo positivo y viceversa para el caso del lóbulo negativo. De esta manera se protege al equipo de sobretensiones. Luego se pueden ver los circuitos operacionales (IC1, IC2), compuestos por



el seguidor de tensión que funge como estabilizador, y por último un circuito sumador el cual introduce el offset de 2,5V a las señales. Inicialmente se había hecho el diseño del sumador con resistencias de $1k\Omega$ pero debido que el offset es común para todos los canales, introducía corrientes de fuga a los otros canales. El problema se resolvió aumentando las resistencias a $1M\Omega$.

4.1.1.2 Acondicionamiento de las señales de corriente

El diseño esquemático del circuito de acondicionamiento por canal de corriente se puede observar en la **figura 4.2**.

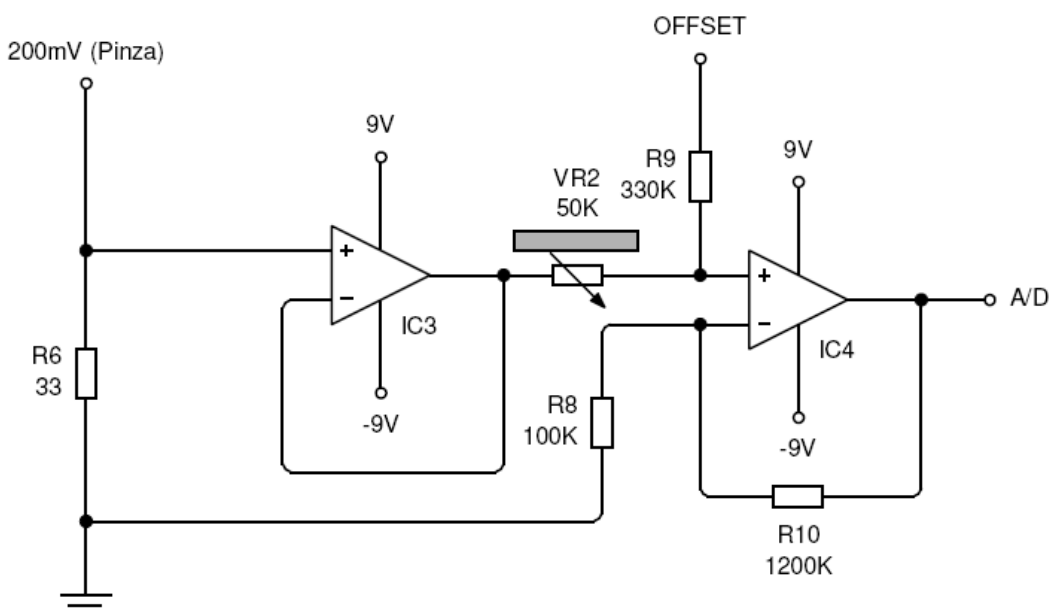


Figura 4.2 - Canal de acondicionamiento de la señal de corriente

En la entrada del circuito se puede observar la resistencia colectora R6 que está conectada al secundario de la pinza amperimétrica, su función es transformar la señal de corriente en una de tensión para poder ser manipulada por los operacionales (IC3, IC4) y captada por el conversor analógico-digital. Se coloca 200mV debido a que es la amplitud obtenida a la salida de la pinza cuando por el primario circulan 10A (máxima corriente entregada por el generador del laboratorio de maquinas).



Capítulo IV



Luego al igual que en los canales de tensión, se encuentra un seguidor de tensión para darle estabilidad a las señales. En la última etapa se encuentra un sumador modificado para que amplifique la señal e introduzca el offset simultáneamente y de esta manera se redujo la cantidad de circuitos operacionales.

4.1.1.3 Fuente de alimentación de la tarjeta

El circuito de alimentación de la tarjeta es como lo muestra la **figura 4.3** a continuación.

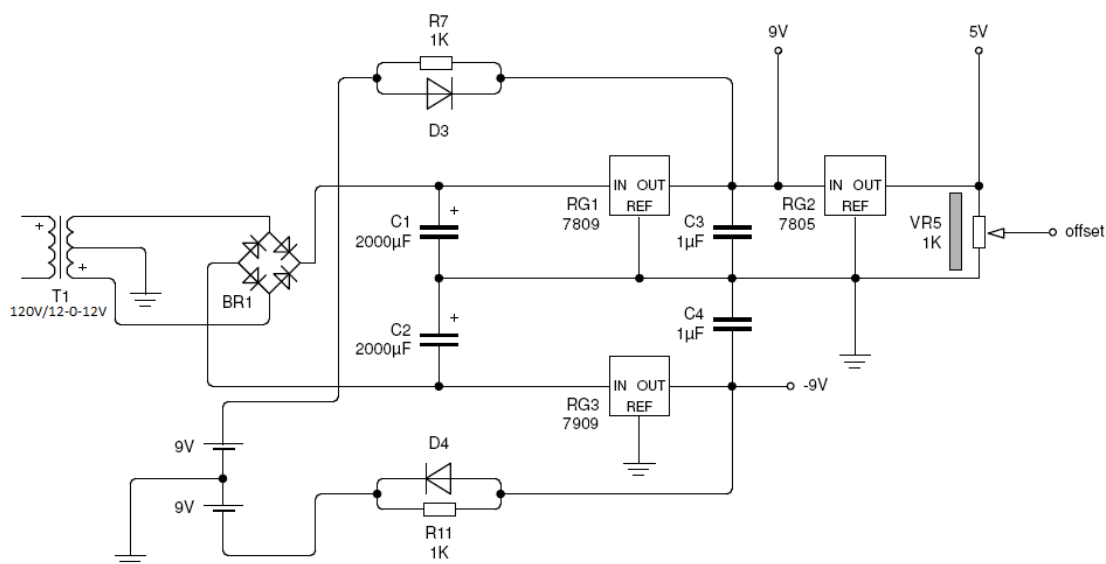


Figura 4.3 - Fuente de alimentación

Por razones de espacio se decidió colocar el transformador de alimentación separado de la tarjeta y externo a la caja de proyectos. Esta fuente posee 3 reguladores de tensión, su respectivo puente rectificador y los capacitores para disminuir el rizado de la señal. Los reguladores son de 9V, -9V y 5V, los dos primeros son para alimentar a los circuitos operacionales. Como se puede observar en el esquema se dejó la previsión para que en caso de falla de energía entren a suplir energía dos baterías de 9V. El regulador de 5V se alimenta del de 9V y su función es alimentar a la tarjeta de adquisición y generar el offset de 2,5V a través de un trimmer de 1k Ω para las señales.



4.1.1.4 Diseño del circuito impreso de la tarjeta de acondicionamiento

A través del programa PCB wizard se realizó el diseño de las pistas, y por razones de espacio se fabricó el circuito impreso en doble capa. El resultado se puede apreciar en la figura 4.4.

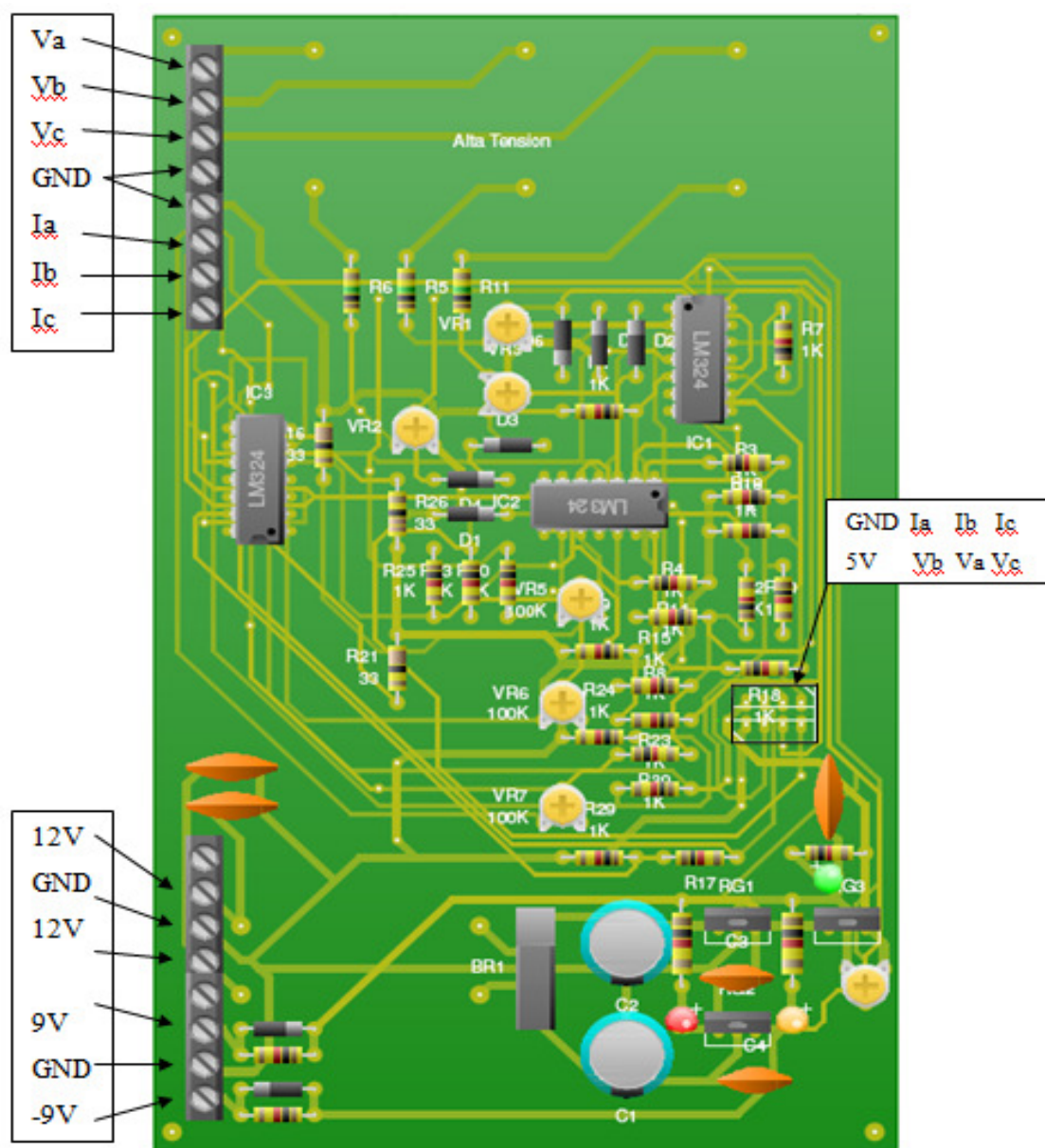


Figura 4.4 - Diseño en digital de la tarjeta de acondicionamiento



Capítulo IV



En la **figura 4.4** se pueden observar las entradas y salidas de la tarjeta de acondicionamiento de datos, en la parte superior izquierda se encuentra la bornera para las señales de entrada que se desean muestrear. En la parte inferior izquierda se encuentra la bornera para conectar el secundario del transformador de alimentación de 12V, y los $\pm 9V$ de las baterías.

Del lado derecho se puede apreciar la disposición de las señales de salida ya acondicionadas y la alimentación de 5V para la tarjeta de adquisición, la conexión entre las dos tarjetas es través de una base de 8 espadines.

Una vez fabricado el circuito impreso y soldado los componentes, la tarjeta quedó como se muestran en la **figura 4.5** y **figura 4.6**; en la primera se pueden identificar sus componentes más importantes. Cabe destacar que los fusibles utilizados a la entrada de los divisores de tensión son de 500mA para proteger a la tarjeta en caso de que ocurra una falla.

También se pueden observar los divisores de tensión con sus respectivos trimmers para controlar la atenuación, los circuitos integrados LM324, los cuales poseen 4 amplificadores operacionales cada uno, los fusibles de 1A para proteger a los reguladores de tensión que son de 1A también, el puente rectificador de la fuente y el trimmer para el control de offset.

Adicionalmente cuenta con leds a la salida de los regulares para detectar fácilmente cuando exista una falla de alimentación, así como para verificar la existencia de las tensiones de salida de cada regulador.



Capítulo IV

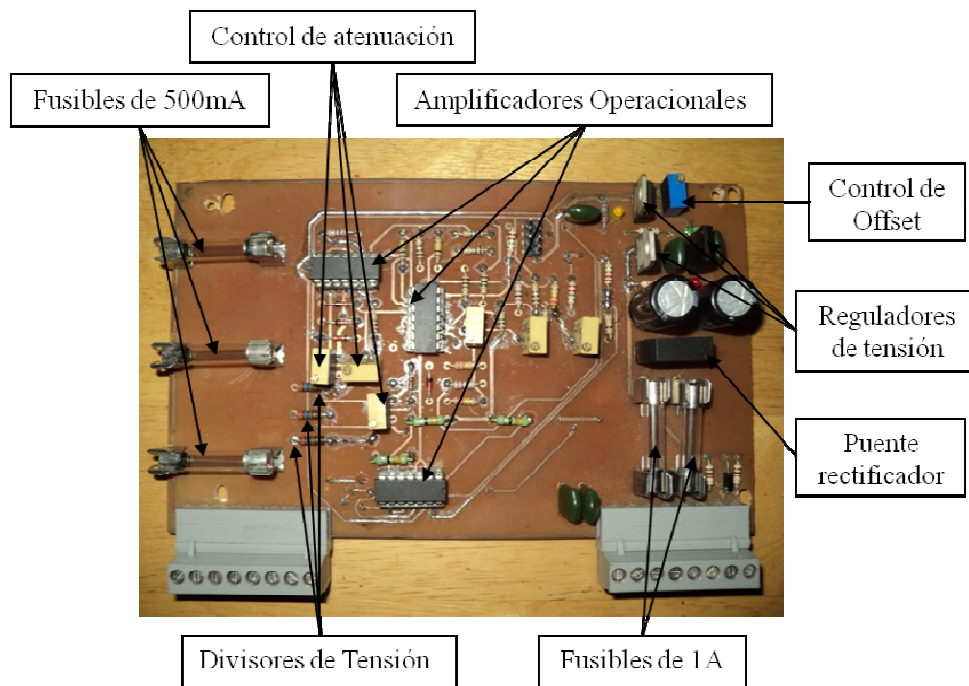


Figura 4.5 - Vista real de la parte frontal de la tarjeta de acondicionamiento

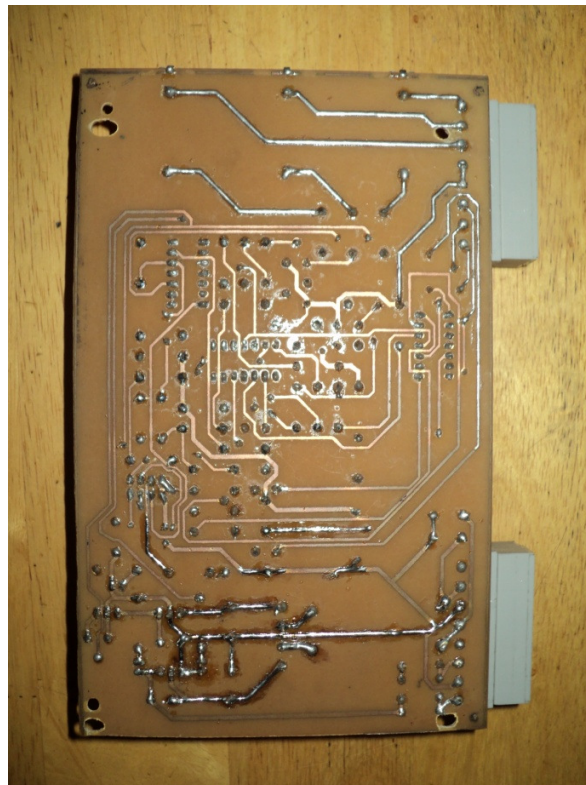


Figura 4.6 - Vista real de la parte trasera de la tarjeta de acondicionamiento



Capítulo IV



4.1.2 Tarjeta de adquisición de datos

La función de esta tarjeta es tomar las señales analógicas provenientes de la tarjeta de acondicionamiento y transformarlas en señales digitales para almacenarlas en la memoria con su respectivo registro de fecha y hora. La tarjeta está compuesta por el DSPIC30F6014A, el módulo de comunicación serial, el reloj de tiempo real y la memoria.

4.1.2.1 Microcontrolador

El DSPIC30F6014A es el dispositivo encargado de gestionar la adquisición y almacenamiento de la data recopilada en la memoria SD a través de su módulo SPI, así como también de la comunicación con la PC por el puerto serial y la comunicación I2C con el reloj de tiempo real. En la **figura 4.7** se puede observar el esquema del DSPIC.

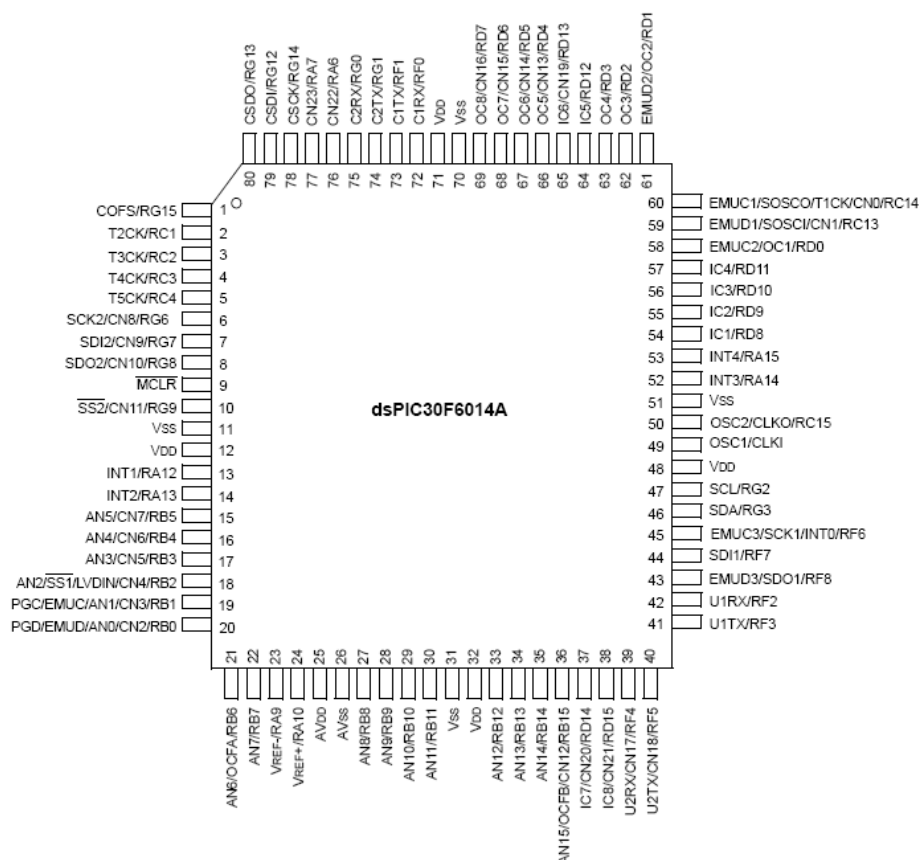


Figura 4.7 - Identificación de los pines del DSPIC30F6014A



Capítulo IV



Para mayor información acerca de estas funciones ver la hoja de datos del DSPIC en el CD del Anexo 1, en la carpeta “Datasheet DSPIC30F6014A”. Cabe destacar que el DSPIC es de montura superficial, y para evitar trabajar con este tipo de soldadura se adquirió el DSPIC ya soldado en una base, la cual normalmente se conecta a un módulo de desarrollo que ofrece la Microchip. Esta base hace la conexión para los pines a través de agujeros en los cuales se incrustan alguna clase de mini-espadines, para la presente investigación se utilizaron terminales de resistencias de $\frac{1}{4}$ W, las cuales se soldaron en la tarjeta para poder conectarla a la base del DSPIC y así tener acceso a sus pines. En las **figuras 4.8 y 4.9** se puede apreciar el microcontrolador con su respectiva base.

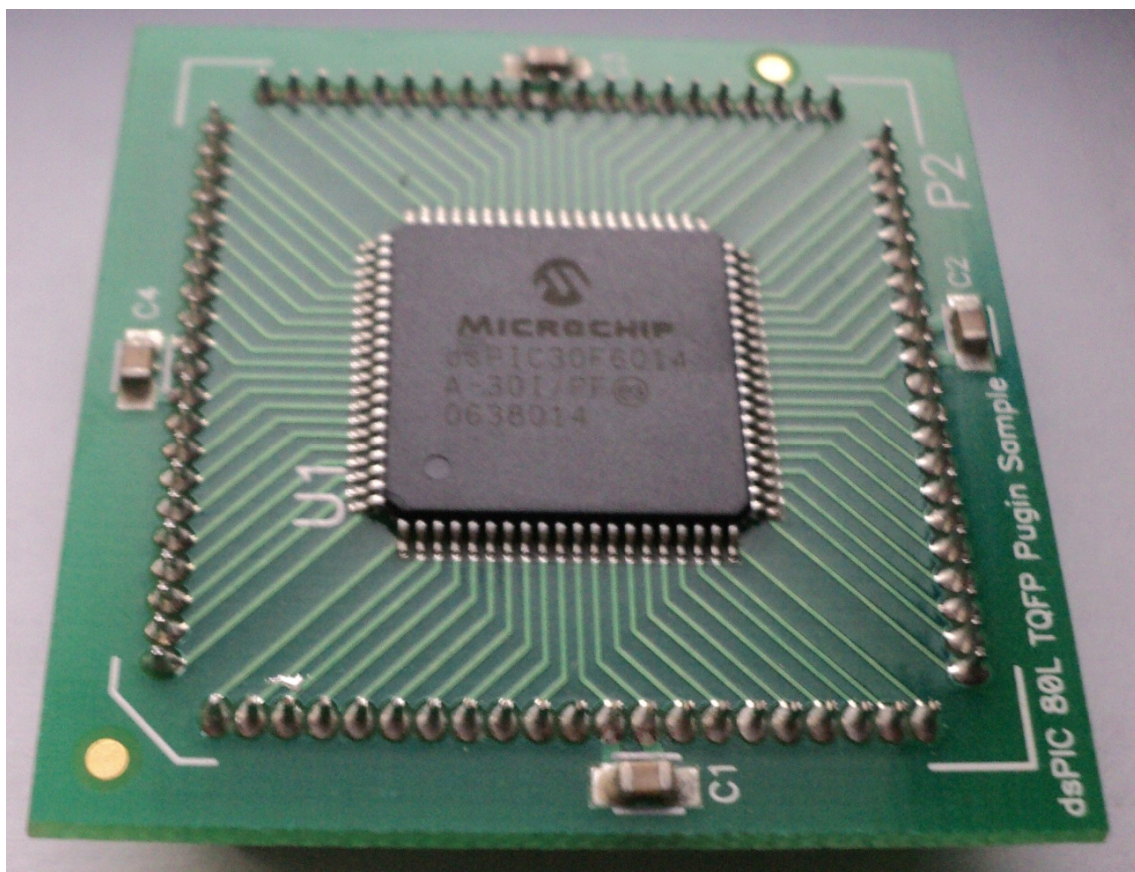


Figura 4.8 - Vista frontal del microcontrolador

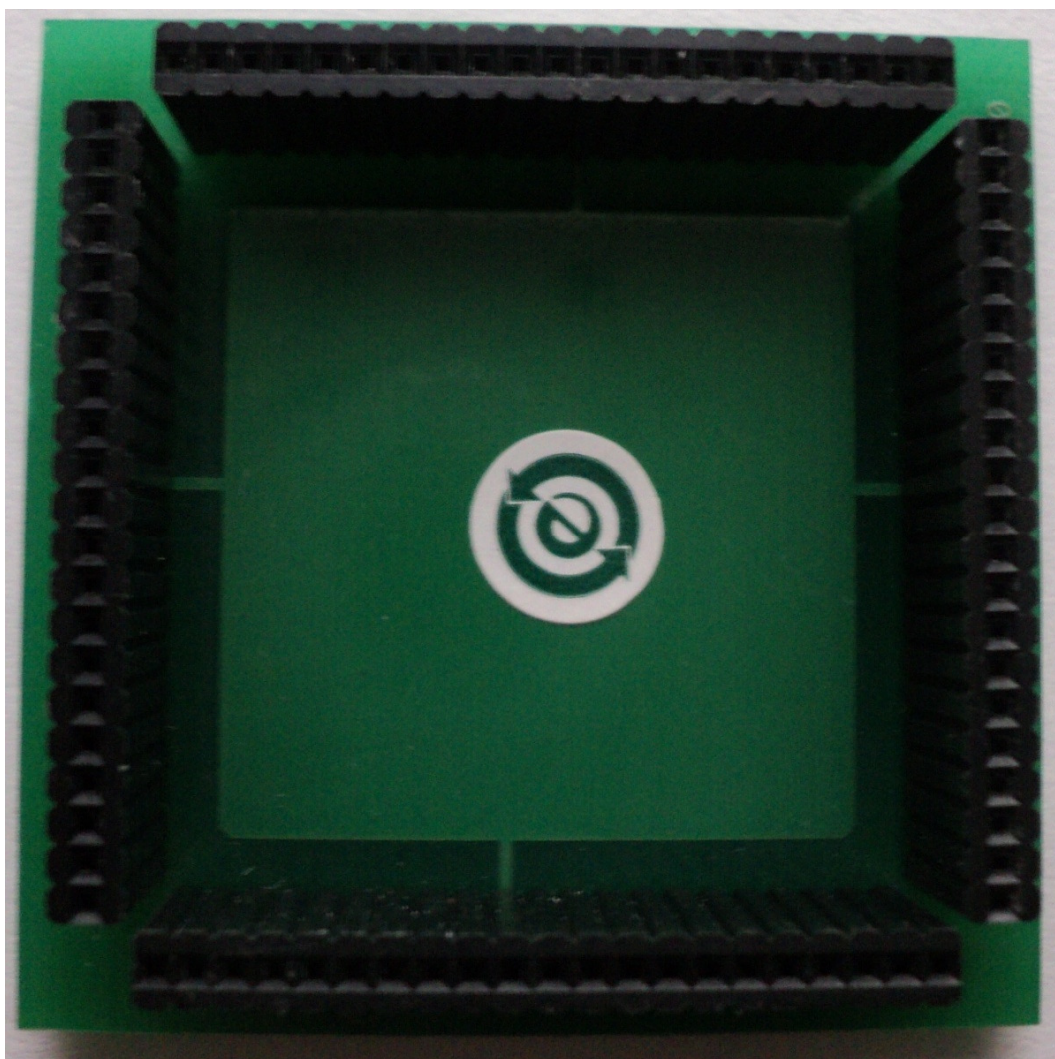


Figura 4.9 - Vista trasera del microcontrolador

4.1.2.2 Módulo de comunicación serial (RS-232)

Para la conexión de la comunicación serial se recurrió a la ayuda del mikrobasic donde aparece el esquema de conexión del MAX232 y se adaptó para el DSPIC30F6014A como lo muestra la **figura 4.10**.

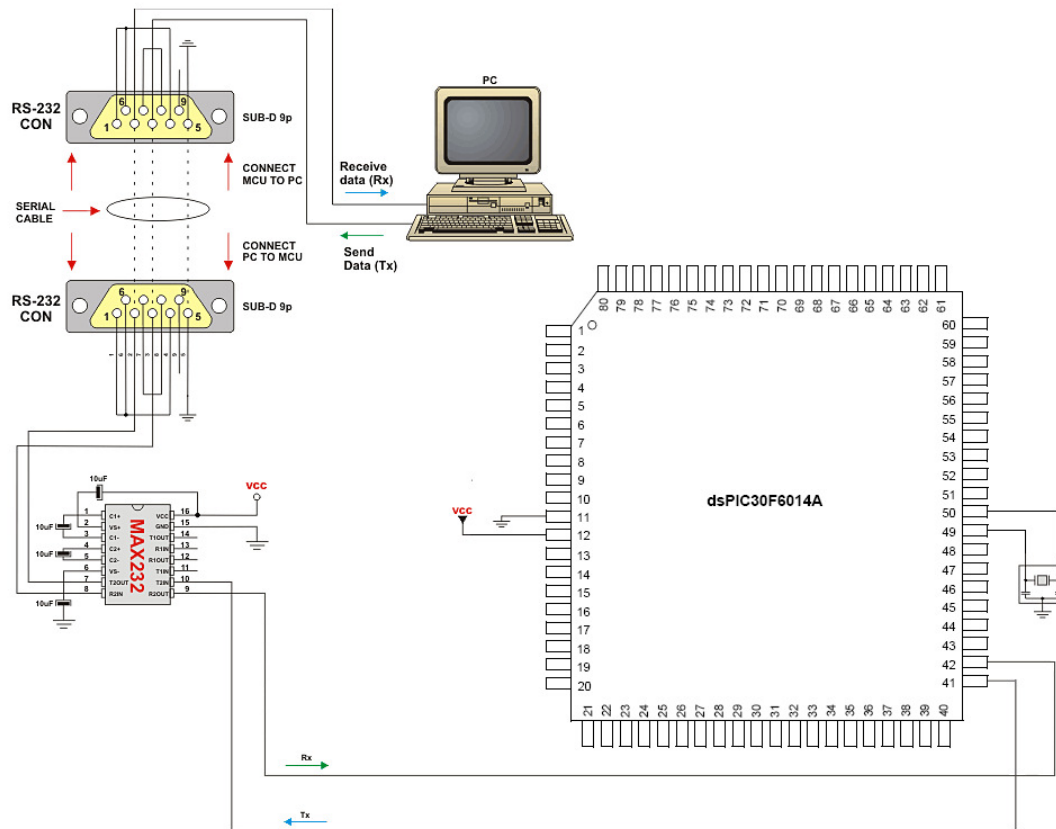


Figura 4.10 - Esquema de conexión del MAX232

Se puede observar en la **figura 4.10** como los pines Rx (Receiver) y Tx (Transmitter) se conectan al MAX232 para transformar los niveles de tensión TTL del pic (0-5V) a los niveles de tensión de RS232 ($\pm 10V$) y viceversa. A través de este módulo el dspic envía y recibe datos de la computadora a través de la interfaz, concernientes a la duración de la campaña que se vaya a realizar.



4.1.2.3 Reloj de tiempo real DS1307

Para la conexión con el reloj de tiempo real se recurrió a la hoja de datos del DS1307 (Ver Anexo 7) donde se estudió el esquema recomendado y se adaptó al dsPIC como lo muestra la **figura 4.11**.

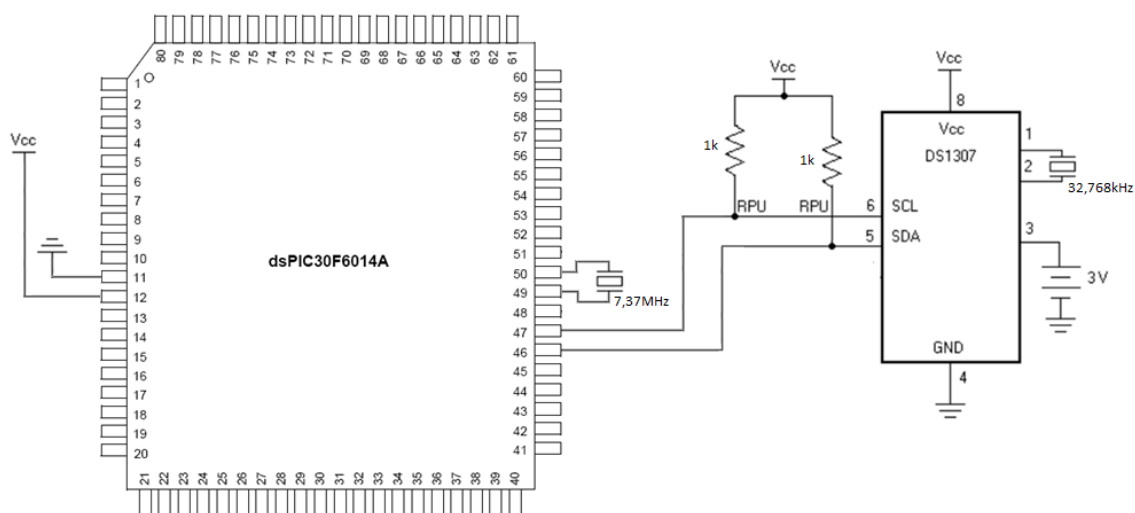


Figura 4.11 - Esquema de conexión del DS1307

La función de este circuito integrado es proporcionarle al PIC la información de la fecha y hora cada vez que este lo requiera. Para lograr esto debe contar con un cristal 32,768kHz y una batería de 3V lo cual le brinda autonomía para llevar la cuenta del tiempo. Cabe destacar que para que la comunicación I2C entre pic y RTC se logre correctamente los pines de comunicación SCL (serial clock) y SDL (serial data line) deben contar con sus respectivas resistencias de pull-up.

4.1.2.4 Memoria SD

La función de esta memoria es almacenar los valores instantáneos de las 6 señales generadas por el conversor analógico digital del DSPIC, con su respectiva fecha y hora cada 10 minutos durante el período de la campaña de medición. Para que la memoria



Capítulo IV



funcione correctamente requiere de una alimentación de 3,3V entregados por el regulador de tensión, además de la conexión de sus pines para llevar a cabo la comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) con el DSPIC. La forma de conectarse puede observarse en la tabla 4.1 y en la **figura 4.12**.

Tabla 4.1 Conexión SD-DSPIC

Memoria SD		DSPIC	
Nombre	Pin	Nombre	Pin
Chip select (CS)	1	PORTG.15 (RG15)	1
Serial Clock (SCK)	5	Serial Clock (SCK)	6
Data Out (Dout)	7	Serial data Input (SDI)	7
Data In (Din)	2	Serial data Output (SDO)	8

Fuente: Propia

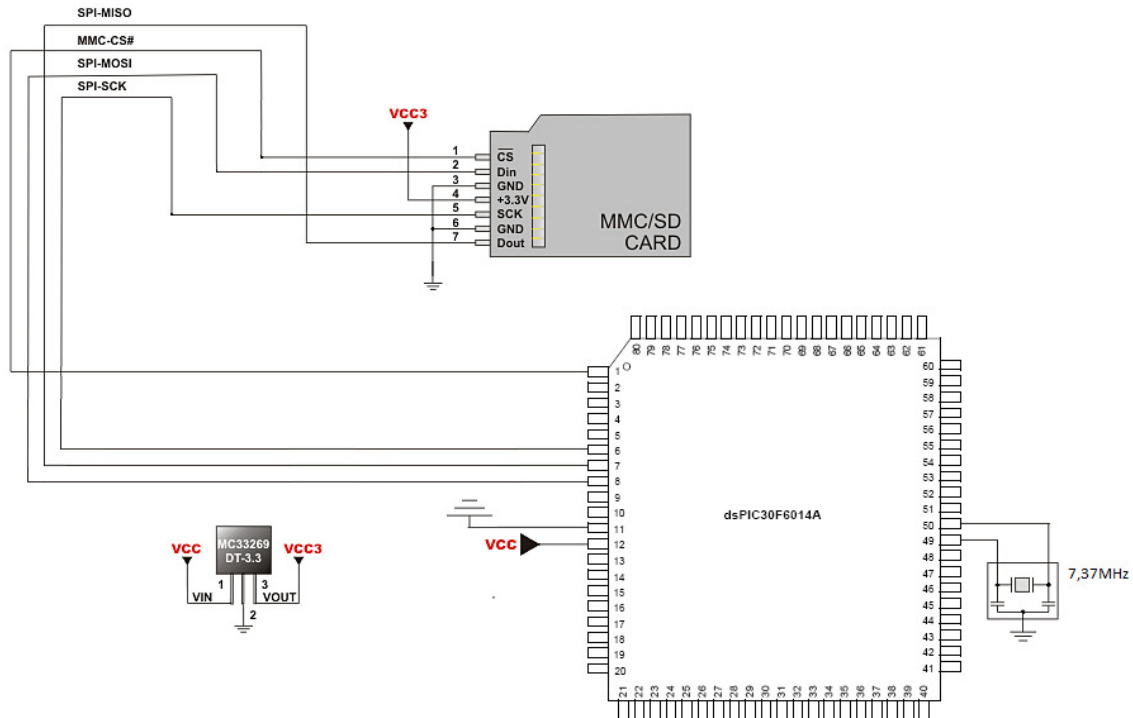


Figura 4.12 - Esquema de conexión con la memoria SD



Cabe destacar que el esquema conexión proporcionado por la ayuda de mikrobasic posee tres divisores de tensión para las señales CS, SCK y SDO provenientes del DSPIC cuya función es reducir los niveles de tensión TTL a los 3,3V de alimentación de la SD. Sin embargo esta conexión no funciono, por lo que después de probar diferentes formas de conexión se optó por la mostrada en la **figura 4.11**, en la cual se eliminaron los divisores de tensión y se conectaron directamente los pines del DSPIC con los de la tarjeta. Esta conexión no presentó ningún tipo de problema.

Es importante resaltar que el DSPIC30F6014A posee dos módulos para comunicación SPI, se decidió trabajar con el módulo SPI2 dada la conveniente ubicación de sus respectivos pines, ya que no interfieren con los demás periféricos del DSPIC.

4.1.2.5 Diseño del circuito impreso de la tarjeta de adquisición

A través del programa Eagle se realizó el diseño de las pistas y el resultado se puede apreciar en la **figura 4.13**.

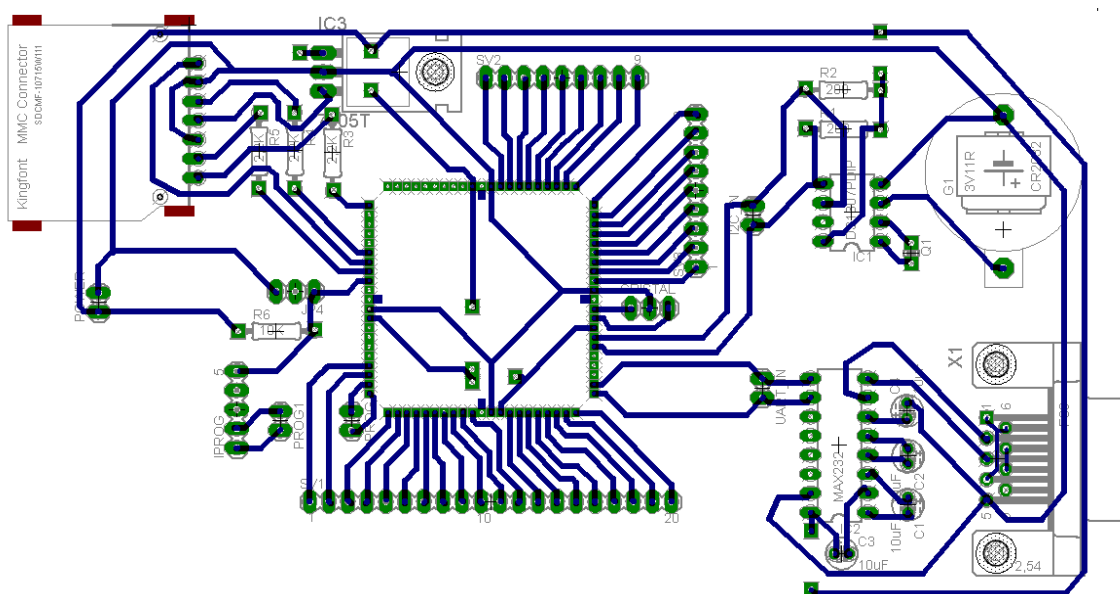


Figura 4.13 - Diseño en digital de la tarjeta de adquisición



Capítulo IV



Se pueden observar los elementos que componen a la tarjeta de adquisición, en la parte superior izquierda se encuentran los terminales para conectar la memoria SD con su respectivo regulador de 3,3V, dado que la misma va dispuesta en el panel frontal del equipo, se dejaron unas bases torneadas en la tarjeta para llegar con cables a la memoria. En el centro se encuentran los terminales para la conexión con la base del DSPIC, en la parte superior derecha está el DS1307 con su batería de 3V, resistencias de pull-up y los terminales del cristal de 32,768kHz, en el área inferior derecha se puede hallar el MAX232 con sus respectivos condensadores y los terminales para el puerto serial DB9, que al igual que la memoria SD se solucionó con bases torneadas ya que también debe ir en el panel frontal.

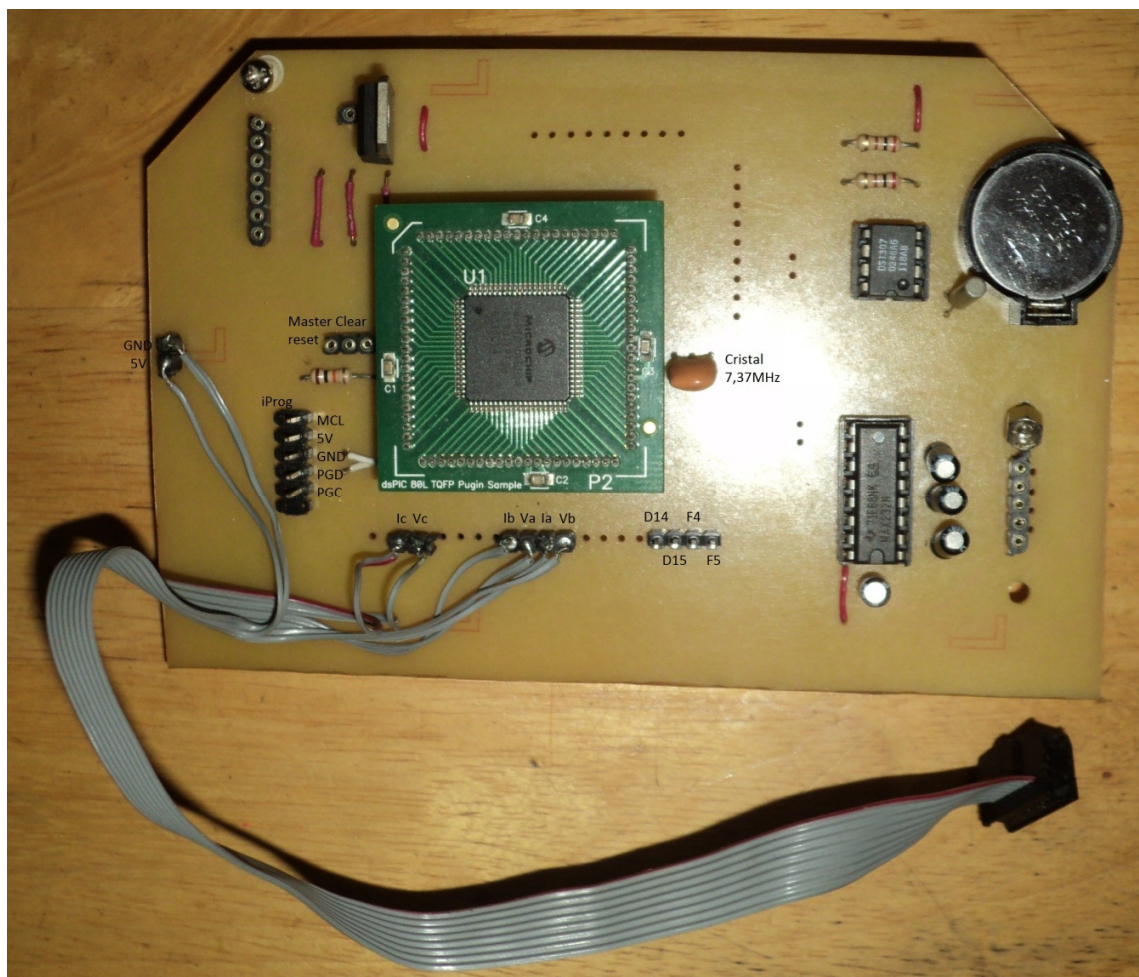


Figura 4.14 - Vista real de la parte frontal de la tarjeta de adquisición



Capítulo IV



En la **figura 4.14** se puede apreciar la tarjeta con sus elementos ya soldados, también se puede identificar el cable que comunica esta tarjeta con la de acondicionamiento, el cual conecta las señales a adquirir y la alimentación. Las señales se conectan a los canales del conversor analógico digital AN6 (Ic), AN7 (Vb), AN8 (Ib), AN9 (Va), AN10 (Ia) y AN11 (Vc). A la izquierda del DSPIC se encuentran las bases torneadas para conectar los cables provenientes del pulsador de “Reset” o Master clear reset ubicado en el panel frontal, además se pueden ver los espadines para la conexión del iProg. Para los leds de señalización se utilizaron como salida los pines RD14 (Encendido), RF4 (Adquiriendo) y RF5 (Fin de Campaña). En el caso de pin RD15 se configuró como entrada para recibir la señal del suiche “Empezar/Programando” el cual se utiliza para dar inicio a la campaña de medición una vez programado el periodo de duración.

En la **figura 4.15** se pueden observar las pistas de la tarjeta en la parte de atrás, los dos cables blancos que aparecen soldados en las pistas son para alimentar al DSPIC mientras al mismo se le carga el programa a través del iProg.

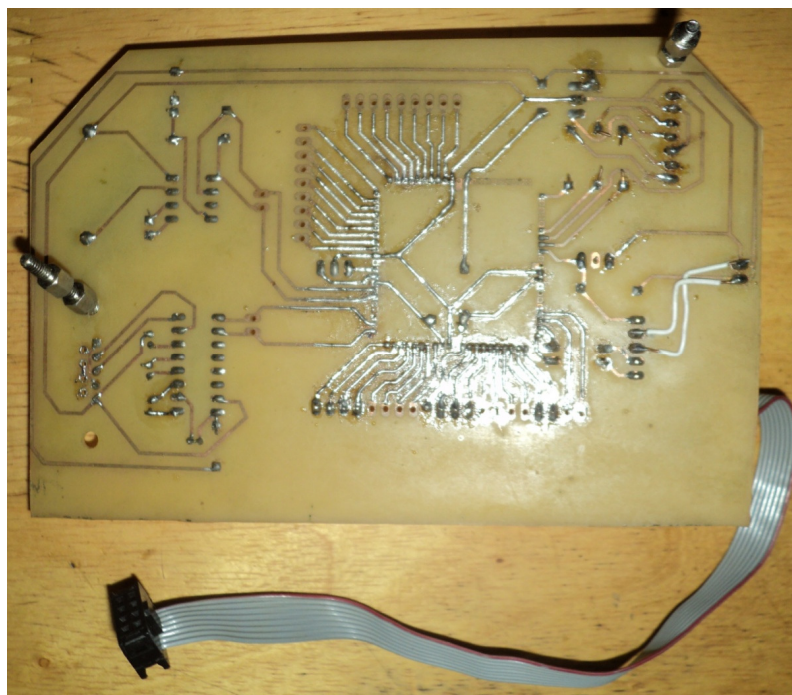


Figura 4.15: Vista real de la parte frontal de la tarjeta de adquisición



4.1.3 Caja de proyectos y elementos externos

La caja de proyectos además de contener y proteger las tarjetas de acondicionamiento y adquisición, posee el panel frontal para el usuario. En la **figura 4.16** se puede apreciar el diseño del panel frontal.

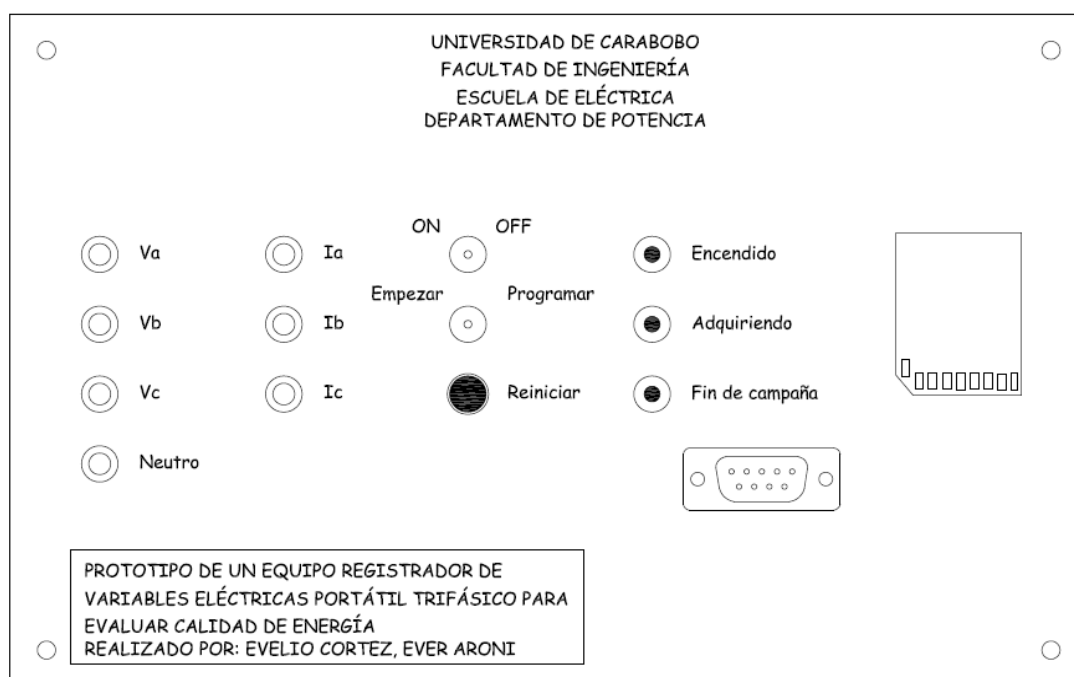


Figura 4.16 - Panel frontal

En la primera columna del lado izquierdo se encuentran los conectores banana hembra para recibir las señales de tensión y el neutro, en la siguiente columna están los conectores jack mono hembra de 3,5mm para recibir las señales de las pinzas amperimétricas, en la columna central se pueden apreciar los elementos de control, el primero es un suiche tipo bate de dos polos para conectar y desconectar el transformador de alimentación, el otro suiche tipo bate es de un solo polo y su función dar la señal de inicio a la campaña de medición al DSPIC y está conectado al pin RD15, y por último está un pulsador para reiniciar el programa el cual va conectado al Master Clear Reset.



Capítulo IV



En la última columna se pueden apreciar los leds de señalización, el primer led es para indicar que el equipo está encendido, el segundo led se enciende cuando el equipo empieza a adquirir muestras, si este led empieza a parpadear es debido a que la memoria SD no está conectada o está dañada, el último led se enciende cuando finaliza la campaña de medición.

En la parte derecha del panel se encuentra un adaptador de memorias micro SD en el cual se coloca la memoria donde se va a almacenar la data recolectada, los terminales de este adaptador van conectados con las bases torneadas dejadas en la tarjeta de adquisición. La memoria micro SD es de 265 MB.

En la parte inferior se encuentra puerto DB9 hembra en el cual se conecta el cable serial que comunica al equipo con la interfaz en la computadora.

En la **figura 4.17** se puede apreciar el cableado interno del equipo.

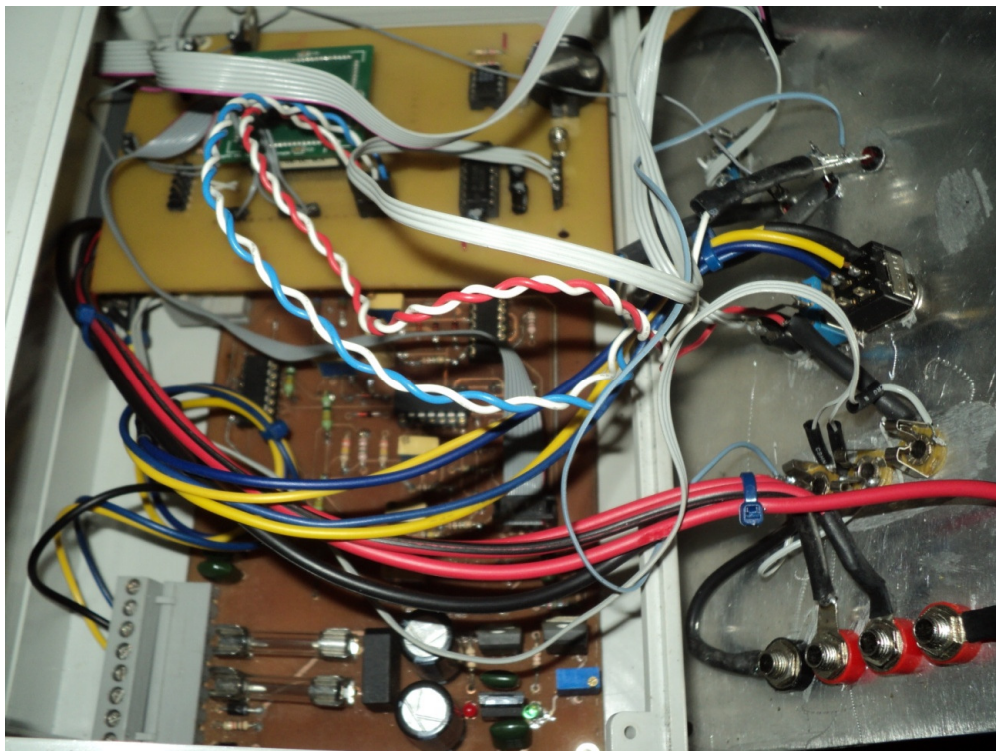


Figura 4.17 - Cableado Interno



En el caso de las pinzas simplemente se tomó la señal del secundario transformador de corriente con cable para teléfono y se conectó al plug mono de 3,5mm como lo muestra la **figura 4.18**.

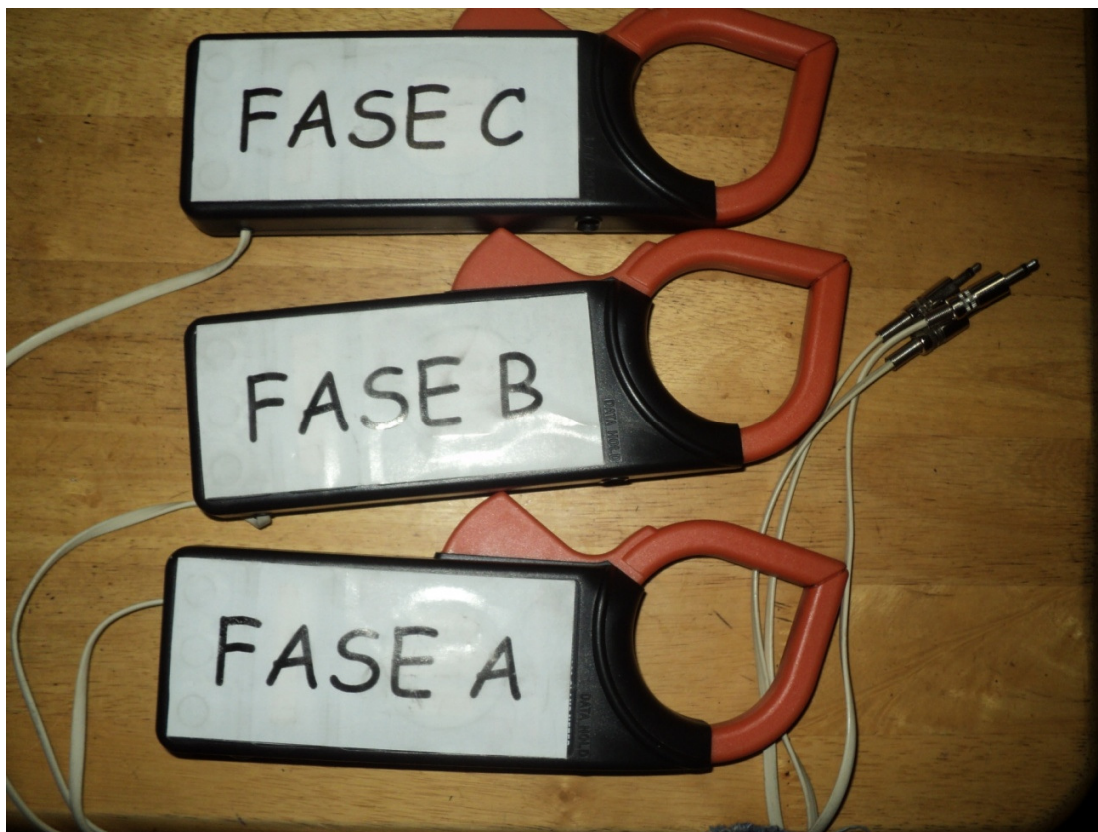


Figura 4.18 - Pinzas amperimetricas

Para la fuente de alimentación se utilizó un transformador de control de 120/12-0-12V y 2A de capacidad, a pesar de que el consumo del Equipo es de 70mA en AC del lado del primario del transformador de alimentación. Por razones de espacio se decidió colocar el transformador de alimentación fuera de la caja de proyectos en una caja aparte, como lo muestran las **figuras 4.19 y 4.20**. Se colocó un suiche de dos polos en el lado de alta para mayor seguridad y control a la hora de hacer reparaciones en el equipo. En el lado de baja se utilizó cable para micrófono para llevar la energía al equipo y la conexión se realizó con un plug estéreo de 3,5mm.



Figura 4.19 - Caja del transformador de alimentación

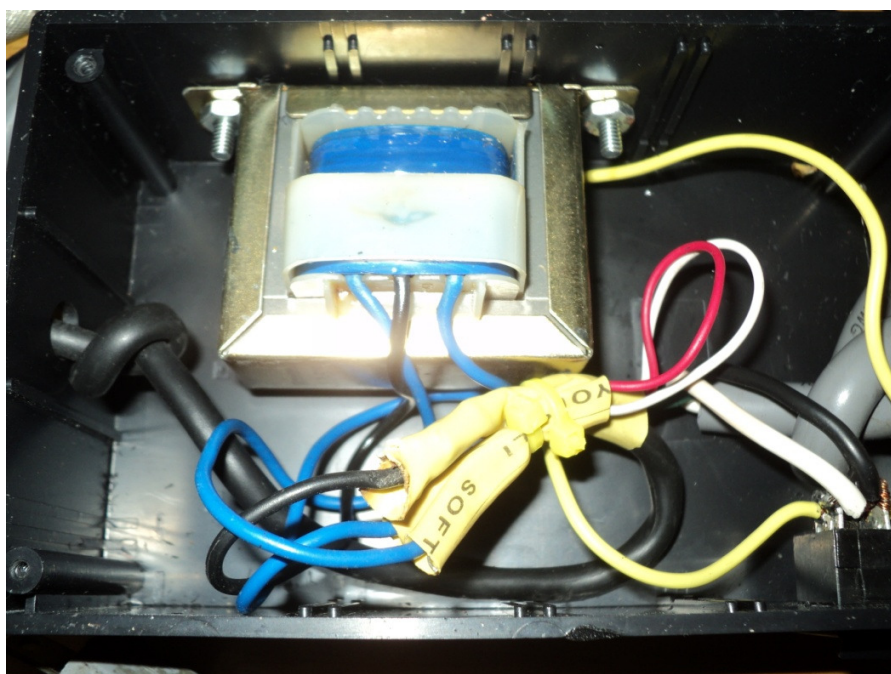


Figura 4.20 - Transformador de alimentación



4.2 Software del DSPIC

El software del DSPIC se desarrolló para indicarle al microcontrolador las tareas que se desean realizar, en la **figura 4.21** se describe de forma resumida y esquematizada el software del equipo.

En primer lugar se deben declarar las variables necesarias para el funcionamiento del programa tales como lo son I, J, K las cuales sirven de control a los ciclos automáticos. También se declararon 6 vectores de 64 elementos cada uno de tipo WORD, cuya función es recibir un período de cada señal a la vez.

Una vez hecho esto, se procede a inicializar los pines que van a recibir las señales, como entradas analógicas (AN6, AN7, AN8, AN9, AN10 y AN11), así como también los pines RD14, RF4 y RF5 como salidas digitales para los leds de señalización (“Encendido”, “Adquiriendo” y “Fin de Campaña” respectivamente). Por último se inicializa el pin RD15 como entrada digital para recibir la señal del suiche ubicado en el panel frontal (“Empezar/Programando”) para darle inicio a la campaña de medición. Inmediatamente después se enciende el led “Encendido” para indicarle al usuario que el programa ya se está ejecutando. Seguidamente se inicializan los módulos necesarios, como lo son el SPI (Memoria SD), I2C (Reloj de tiempo real), Serial (para recibir data de la PC) y el conversor analógico digital (configurado en 200Ksps).

Para controlar la duración de la campaña de medición, el equipo debe recibir de la interfaz vía serial, la cantidad de períodos de 10 minutos que se van a medir (ejemplo: una campaña de 1 hora posee 6 períodos de 10 minutos).

La instrucción “Quickformat” es una herramienta de la librería MMC (Multimedia Memory Card) de Mikrobasic, la cual formatea la memoria SD y puede devolver 3 valores diferentes, si devuelve “0” indica que la tarjeta se ha formateado exitosamente, si devuelve “1” significa que no se ha logrado formatear correctamente y si devuelve 255 indica que la



Capítulo IV



memoria SD no fue detectada. Partiendo de lo anterior se hizo un bloque de decisión donde si la función retorna “0” empieza realizar la campaña y se enciende el led “Adquiriendo”, si devuelve “1” ó “255” se encenderá de manera intermitente el led “Adquiriendo”, para indicar al usuario que hay un problema con la memoria SD.

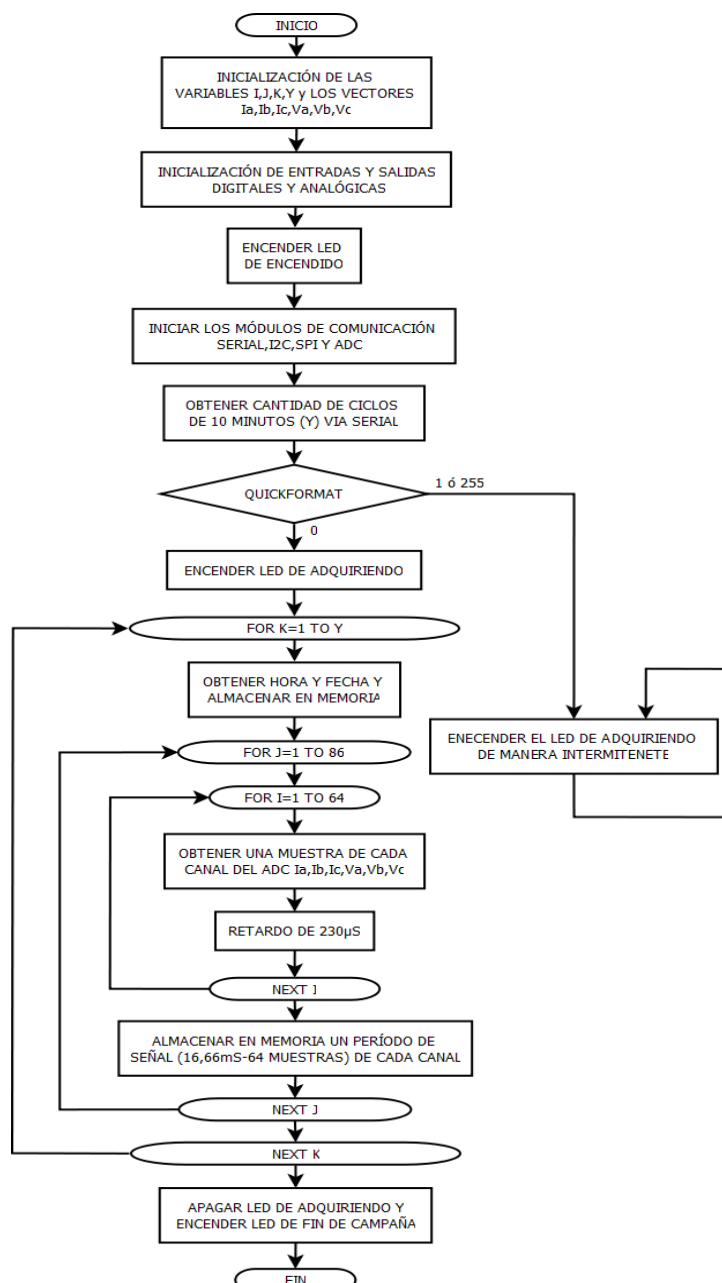


Figura 4.21 - Diagrama de flujo simplificado del programa implementado en el DSPIC.



Al tener ya la tarjeta SD formateada se procede con los ciclos automáticos para realizar la adquisición. El ciclo más interno controlado por la variable I, se encarga de recabar 64 muestras (1 período de una señal de 60Hz) por canal almacenándolas en sus respectivos vectores. El ciclo intermedio se encarga de recabar 86 períodos de cada señal, esta adquisición la realiza el DSPIC en un tiempo de 10 minutos, es por esta razón que el ciclo mas externo realiza tantas vueltas como períodos de 10 de minutos tenga la campaña que se desea medir. Una vez terminada la adquisición se apaga el led “Adquiriendo” y se enciende el led “Fin de Campaña”, finalizando así la campaña de medición. Para observar el código completo escrito en BASIC para el control del DSPIC ver Anexo 2.

4.3 Interfaz de usuario del registrador

En líneas generales la interfaz de usuario está compuesta por 3 módulos, en la **figura 4.22** se puede apreciar el diseño de estos módulos y a continuación se describen sus funciones por separado.

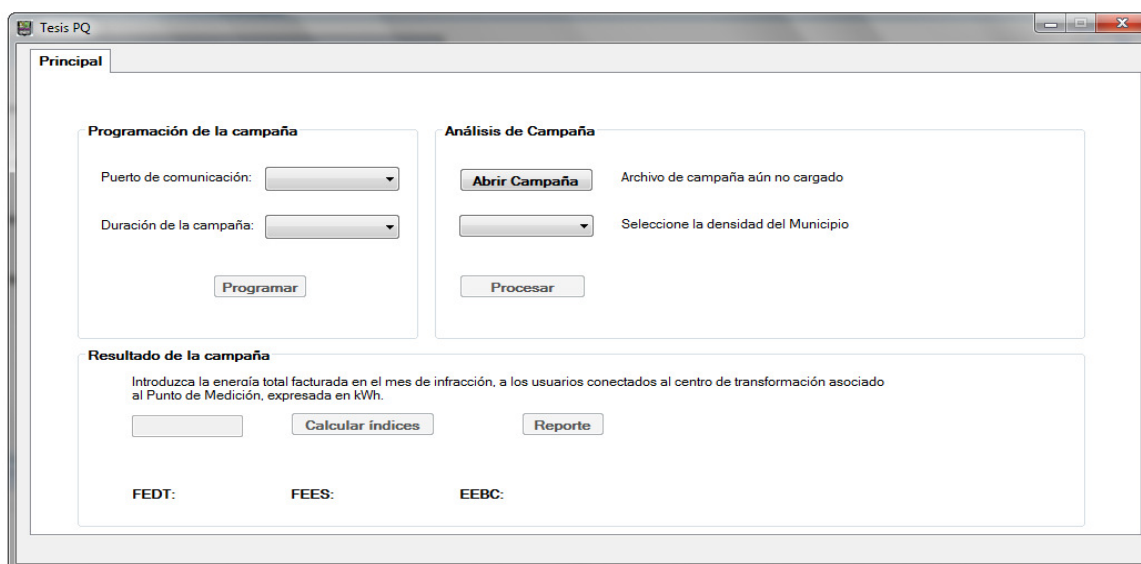


Figura 4.22 - Módulos de la Interfaz de Usuario del equipo



4.3.1 Programación de la Campaña

Esta parte de la interfaz se realizó para que el usuario le indique al registrador la duración de la campaña a realizar, a través del puerto serial. Para ello se colocó un combobox en el cual se selecciona el puerto donde está conectado el cable serial (COM3, COM5, etc.), el segundo combobox sirve para que el usuario seleccione la duración la campaña (1 hora, 12 horas, 1 día o 1 semana). Una vez seleccionado los dos parámetros se debe enviar la información al registrador, para ello se adicionó el botón “Programar” dentro del cual se encuentra la instrucción envío.

4.3.2 Análisis de la campaña de medición

En este bloque de la interfaz se toma el archivo generado por el registrador con los valores instantáneos de las 6 señales durante toda la medición y los transforma en gráficas con las variables eléctricas de interés, promediados cada 10 minutos como lo son:

- Vrms
- Irms
- Energía
- THD de la Tensión
- THD de la Corriente
- Asimetría de la Tensión
- Asimetría de la Corriente

Este módulo está compuesto por el botón “Abrir campaña”, cuya función es abrir un cuadro de dialogo para cargar el archivo de muestras a la interfaz como lo muestra la **figura 4.23**, y el botón “Procesar Campaña”, en el cual se alojan las instrucciones que transforman las muestras registradas por el equipo, y en base a éstas, calcula las variables



Capítulo IV



eléctricas de interés para luego desplegar las graficas de cada variable de interés a través de pestañas tal y como lo muestra la **figura 4.24**.

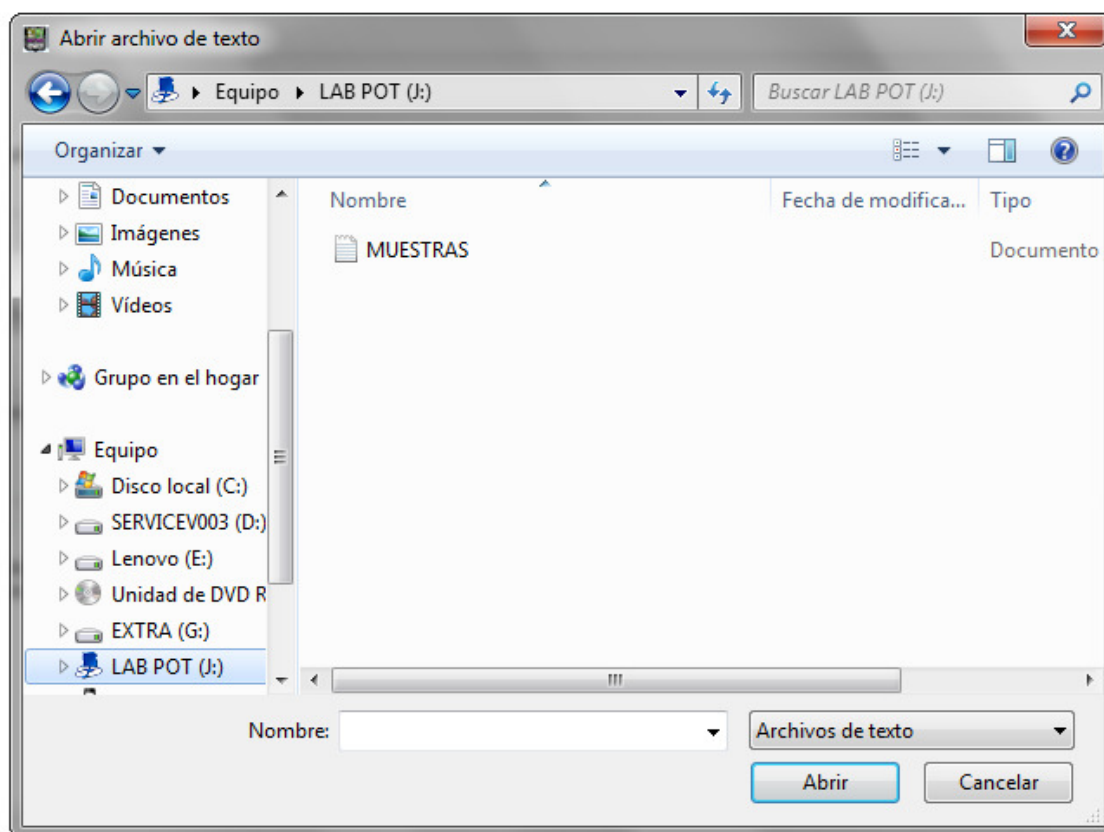


Figura 4.23 - Cuadro de dialogo para cargar el archivo de muestras



Capítulo IV

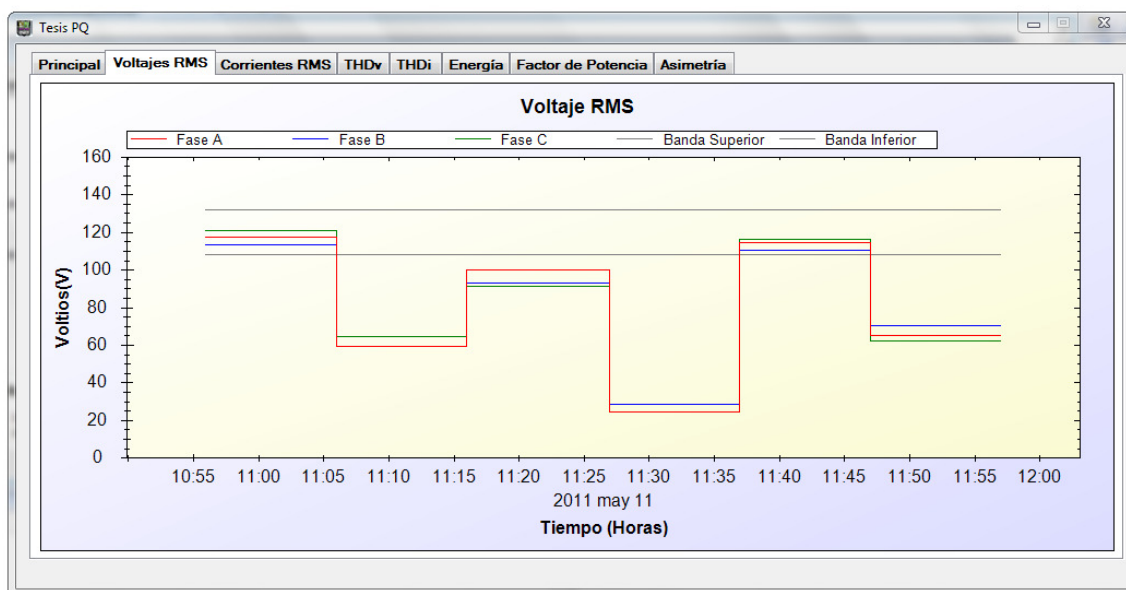


Figura 4.24 - Pestañas con las graficas de las variables de interés

Es importante destacar que la librería de graficación de Visual Basic permite al usuario hacer un “zoom” o acercamiento en la gráfica utilizando el scroll del mouse al mismo tiempo que la escala de la gráfica se auto-ajusta. En la **figura 4.25** se puede apreciar el “zoom”.

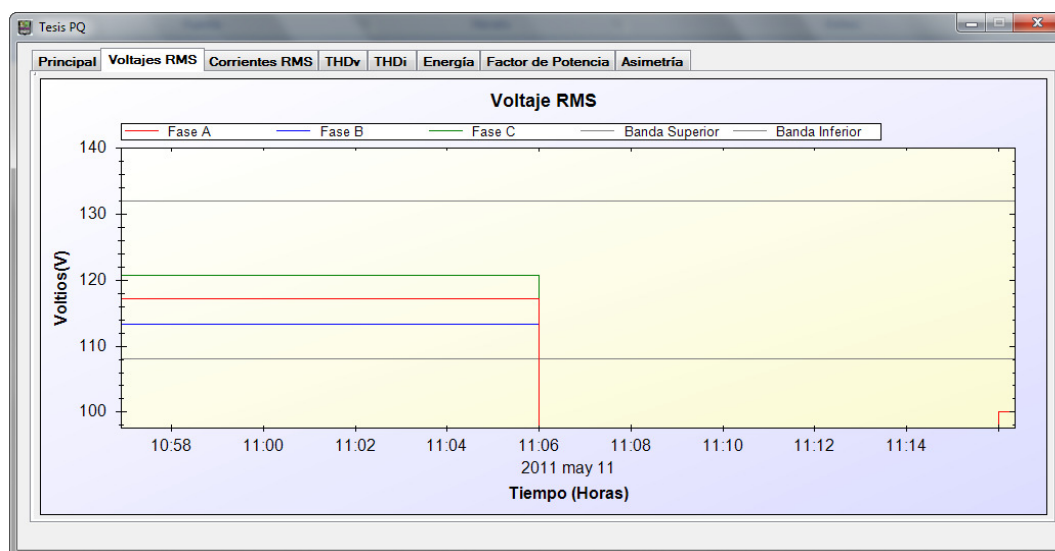


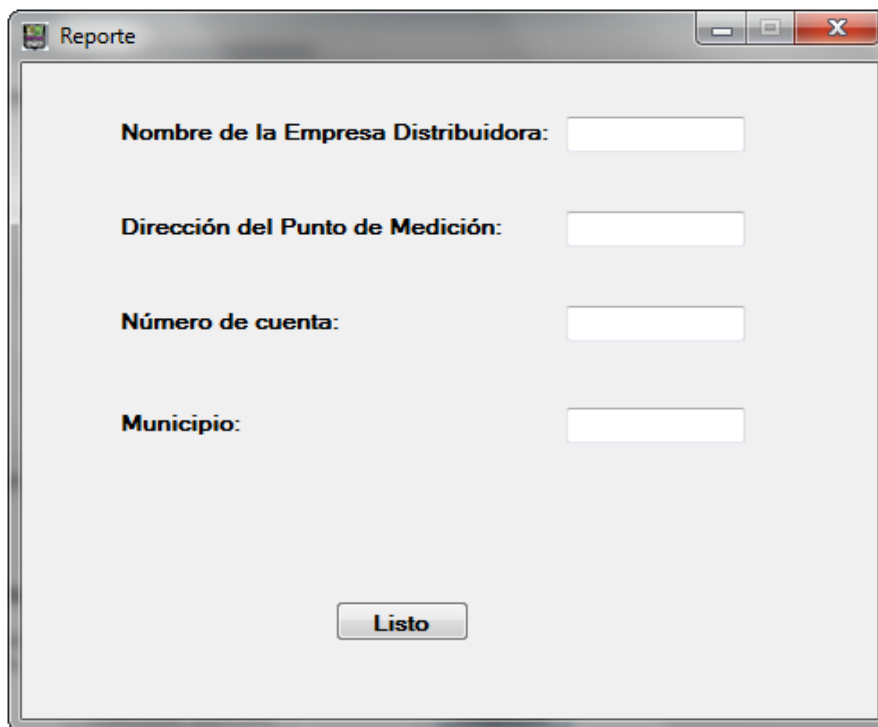
Figura 4.25 – Grafica con “zoom”



4.3.3 Resultado de la Campaña

En esta parte de la interfaz, se realiza el cálculo de los índices de calidad de energía (FEDT, FEES y EEBC), pero debido a que para el cálculo del índice EEBC se requiere el dato de la energía total facturada en el mes de infracción a los usuarios conectados al centro de transformación asociado al punto de medición y dicho valor no lo mide el equipo, se colocó un campo para que usuario lo introduzca por teclado, como se observó en la anterior **figura 4.22**.

Adicionalmente para que quede registro del resultado de la campaña la interfaz es capaz de generar un reporte en formato PDF, el cual contiene las gráficas con las variables de interés y los índices de calidad de energía. Para este fin se colocó el botón “Reporte”, cuya acción es desplegar un cuadro de diálogo donde el usuario pueda rellenar los datos de identificación de la campaña y así estos se agregan al reporte, en la **figura 4.26** se puede detallar dicho cuadro.



The image shows a Windows-style dialog box titled "Reporte". It contains four text input fields with the following labels: "Nombre de la Empresa Distribuidora:", "Dirección del Punto de Medición:", "Número de cuenta:", and "Municipio:". At the bottom center of the dialog is a button labeled "Listo". The dialog has standard Windows window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

Figura 4.26 - Cuadro d Dialogo para la generación del reporte



Una vez que el usuario introduce los datos de Nombre de la Empresa Distribuidora Dirección del Punto de Medición, Número de Cuenta y Municipio, se habilita el botón de “Listo”, el cual contiene la instrucción de generar el reporte y de desplegarlo automáticamente. En el Anexo 3, 4 y 5 se pueden ver los formularios con los códigos de la interfaz de usuario y en el Anexo 6 se encuentra el modelo del reporte.

4.4 Campañas de prueba

Para la prueba del funcionamiento del equipo registrador, se decidió hacer dos Campañas de Medición, las cuales se describen a continuación:

4.4.1 Campaña de prueba de 1 hora

La primera campaña de prueba se realizó en el Laboratorio de Circuitos y Mediciones de la Universidad de Carabobo, el cual cuenta con un Analizador de Parámetros Eléctricos de la marca Circutor, modelo CVM-NRG96 y un Variac trifásico que sirvió de fuente. En esta Campaña se utilizó como carga un banco de 3 bombillos de 200 W conectados en estrella y 3 dimmers. El objetivo de los dimmers en esta prueba es generar distintos niveles de distorsión armónica y valores RMS. Se colocó al equipo registrador y al analizador de parámetros con el Variac ajustado a 120V de tensión de fase a medir simultáneamente las siguientes variables:

- Voltajes de fase RMS.
- Corrientes de fase RMS.
- Energía por fase.
- THD de los Voltajes de fase.
- THD de las Corrientes de fase.

Dado que el analizador solo da las variables anteriores de forma instantánea y el prototipo del equipo registrador las devuelve promediadas cada 10 minutos, se ajustaron los



Capítulo IV



dimmer a una posición fija y cada 10 minutos se cambiaron de posición, de manera que el valor que se lea en la pantalla del analizador sea equivalente al promedio durante esos 10 minutos y pueda ser comparado con el valor arrojado por el registrador. En la **figura 4.27** se puede observar el montaje de forma esquematizada, y en la **figuras 4.28, 4.29 y 4.30** se pueden apreciar imágenes del montaje realizado en el laboratorio.

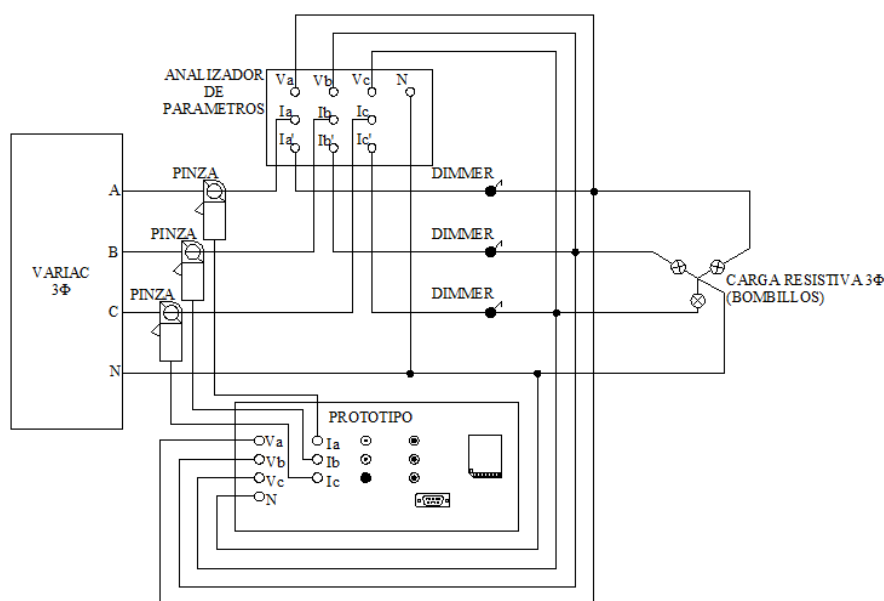


Figura 4.27 - Esquema de montaje para realización de la campaña de prueba

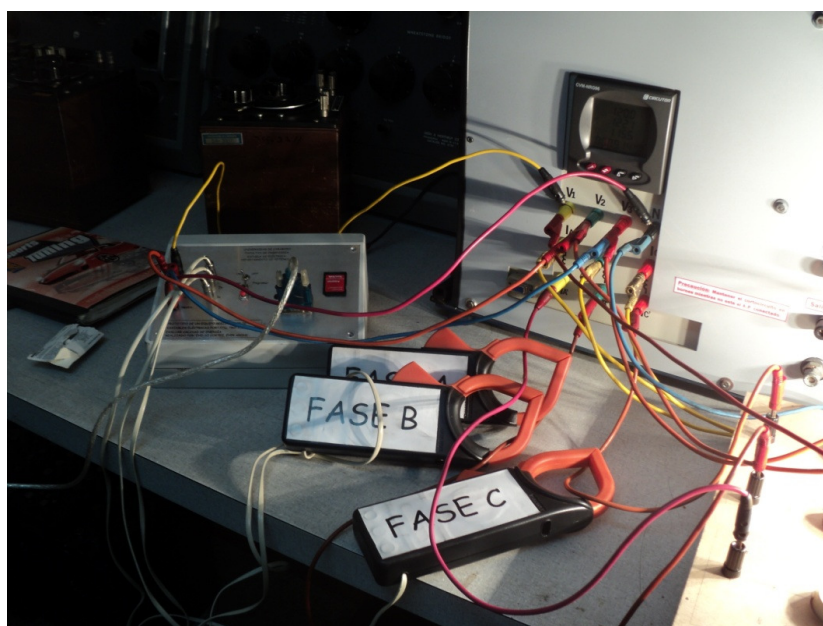


Figura 4.28 - Prototipo y Analizador de Parámetros CVM-NRG96

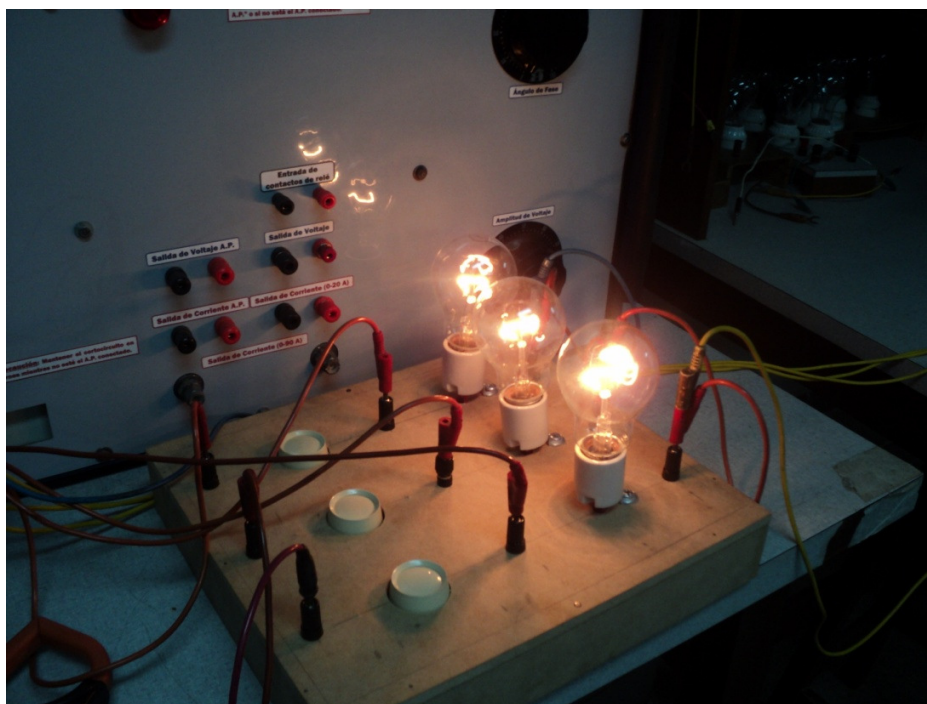


Figura 4.29 - Carga trifásica y dimmers



Figura 4.30 - Variac utilizado como fuente



Capítulo IV



Una vez realizada la campaña se analizó la data recabada por el prototipo con la interfaz desarrollada por los investigadores, y arrojó los resultados que se presentan en las **figuras 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 y 4.37** las cuales indican las gráficas de las variables eléctricas medidas en la campaña.

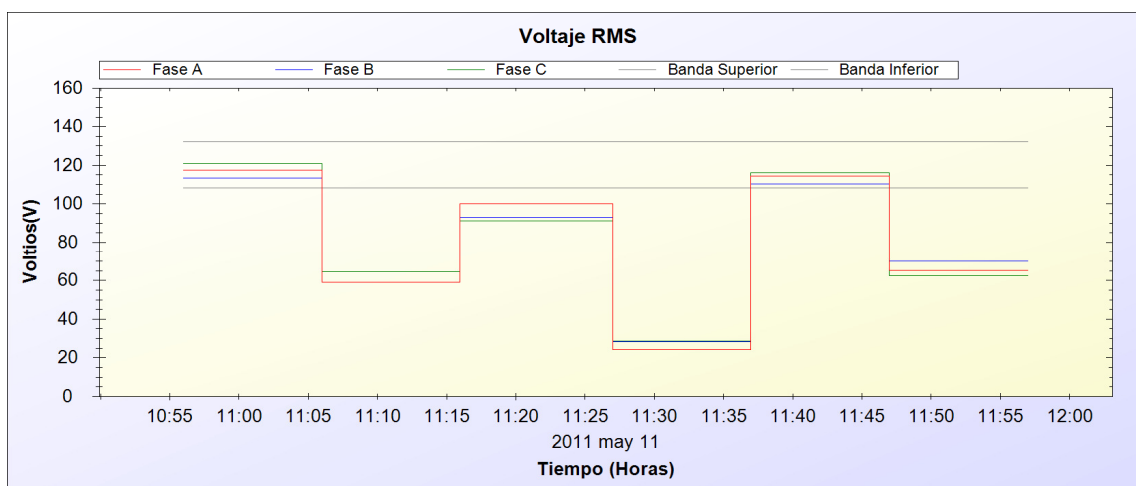


Figura 4.31 - Voltajes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

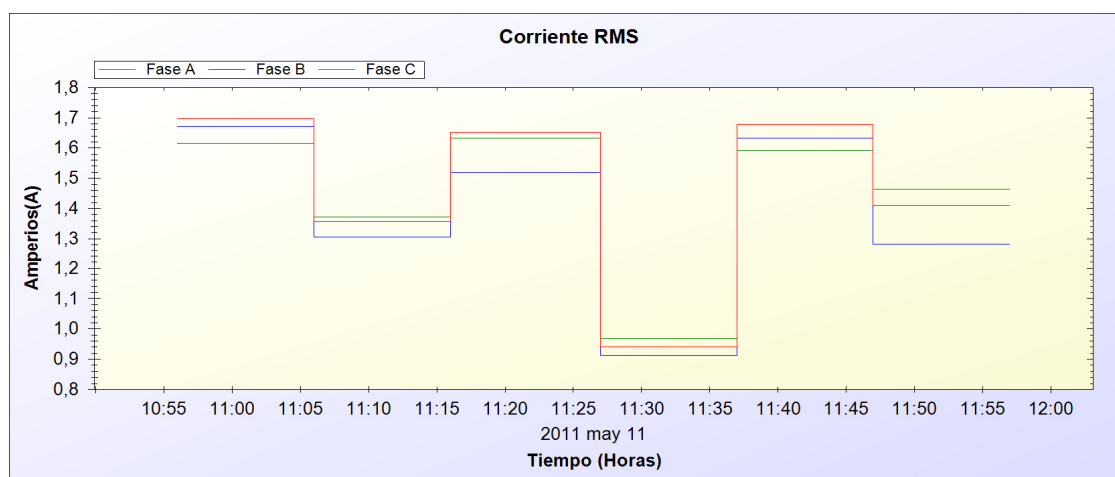


Figura 4.32 - Corrientes RMS promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

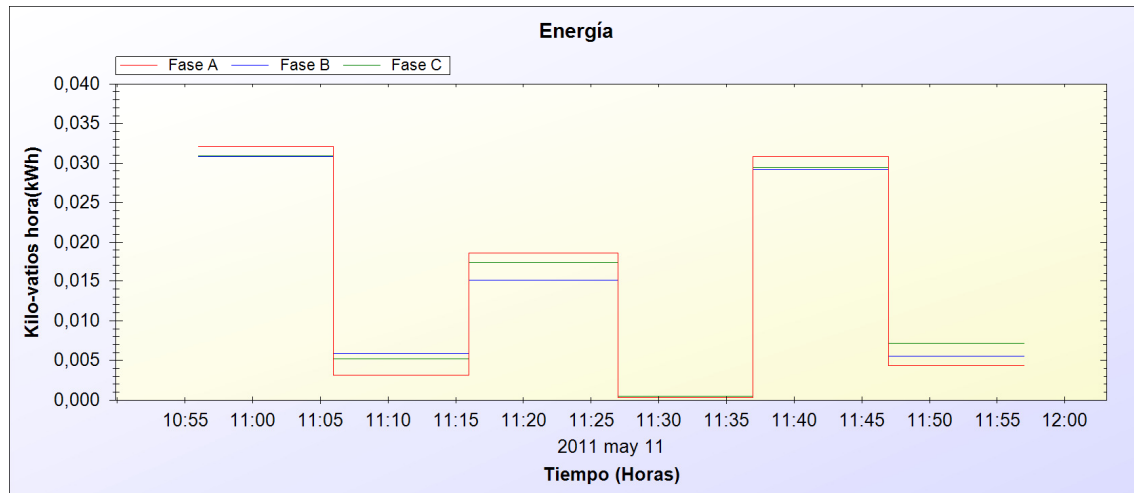


Figura 4.33 - Energía entregada en cada periodo de 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

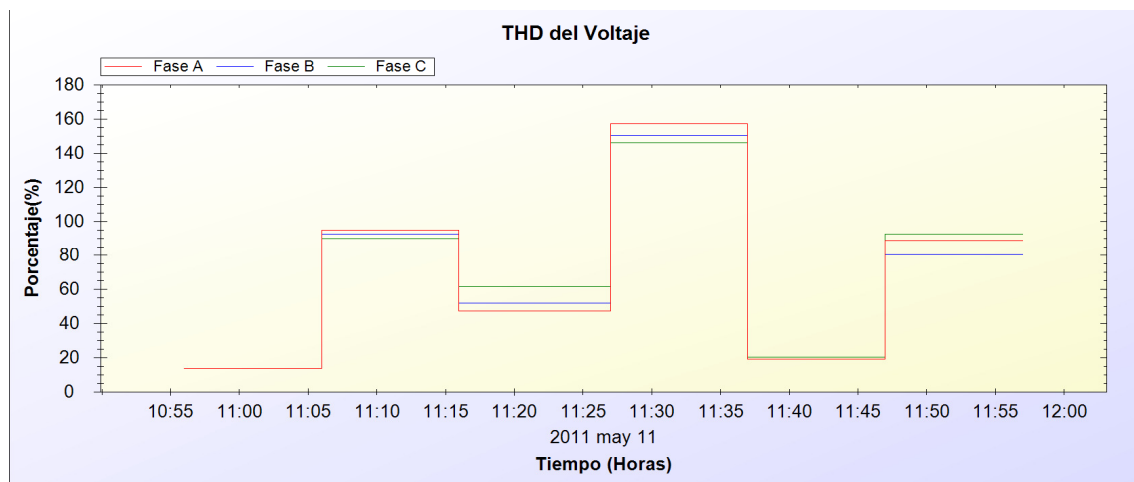


Figura 4.34 - THD's de los Voltajes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora



Capítulo IV

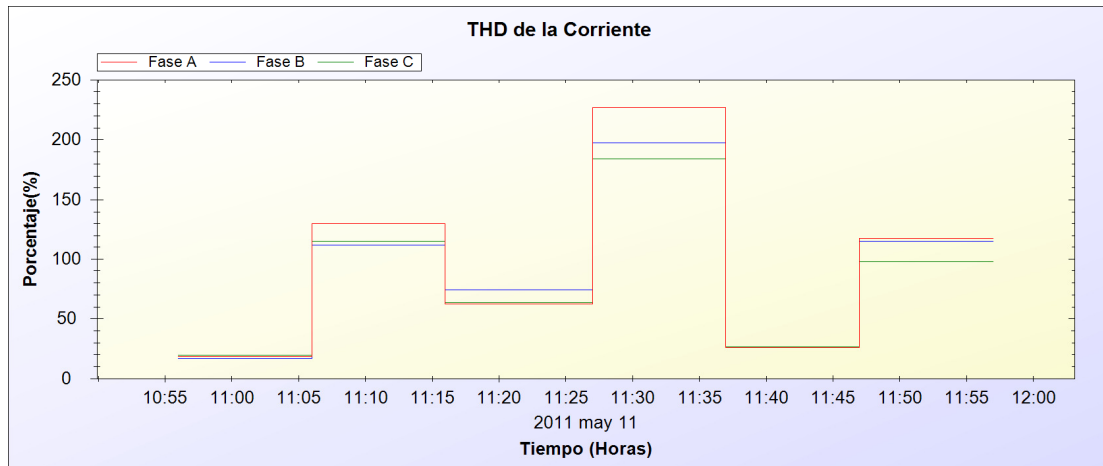


Figura 4.35 - THD's de las Corrientes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

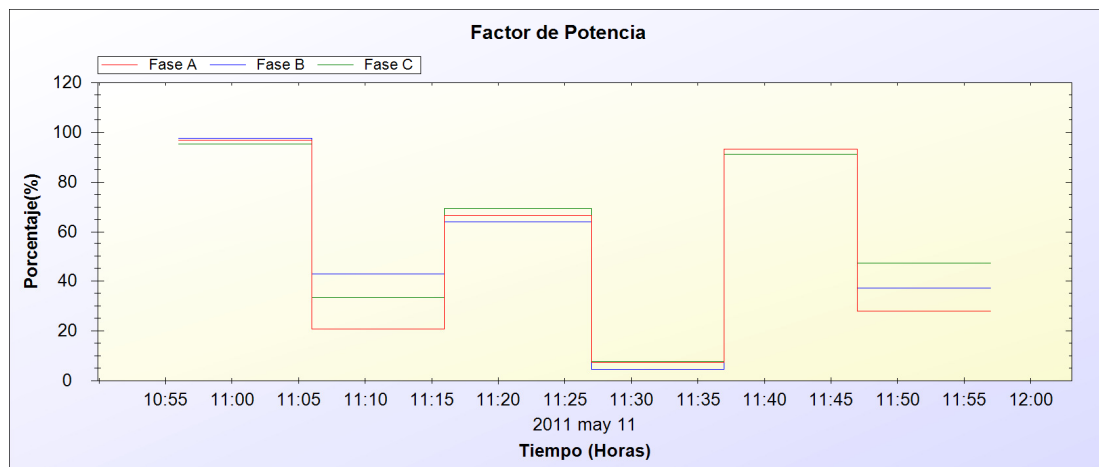


Figura 4.36 - Factores de Potencia promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

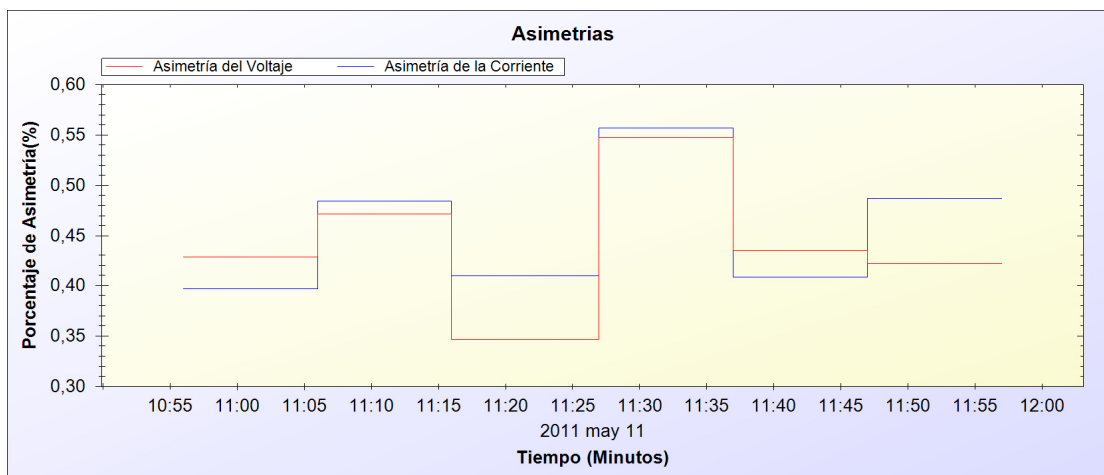


Figura 4.37 - Asimetrías promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

También se calcularon los índices de Calidad de Energía utilizando la interfaz, y los resultados fueron los siguientes:

- **FEDT: 66,6667%**
- **FEES: 31,1796%**

Al observar las gráficas anteriores se puede ver que hay congruencia entre ellas, por ejemplo, la tensión, corriente y energía tienen los mismos perfiles a lo largo de la campaña, esto se debe a la naturaleza resistiva de carga. Cuando la tensión es más alta quiere decir que el dimmer está dejando pasar la sinusoidal casi completa (el dimmer siempre suprime una parte de la señal), por lo cual existe menos distorsión.

A continuación se muestran las tablas comparativas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 de los valores de las variables medidas por el prototipo desarrollado por los investigadores y el analizador de parámetros eléctricos del



Capítulo IV



laboratorio. Cabe destacar que no se compararon todas las variables, debido a que el analizador no las media o las media de forma errónea.

Tabla 4.2 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_a medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	V_a (V) Analizador	V_a (V) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	119,6	117,1869	2,0176	2,4131
11:06-11:16	54,4	58,9637	8,3892	4,5637
11:16-11:27	102,3	100,0552	2,1943	2,2448
11:27-11:37	23,6	23,9366	1,4263	0,3366
11:37-11:47	119,9	114,2496	4,7126	5,6504
11:47-11:57	62,9	65,1801	3,6250	2,2801

Fuente: Propia

Tabla 4.3 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_b medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	V_b (V) Analizador	V_b (V) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	121,4	113,2813	6,6876	8,1187
11:06-11:16	62,0	59,0198	4,8068	2,9802
11:16-11:27	92,1	92,9072	0,8764	0,8072
11:27-11:37	24,9	28,2119	13,3008	3,3119
11:37-11:47	122,0	110,0071	9,8302	11,9929
11:47-11:57	58,8	69,9407	18,9468	11,1407

Fuente: Propia



Tabla 4.4 Cuadro comparativo de los valores RMS de V_c medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	V_c (V) Analizador	V_c (V) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	114,8	120,6084	5,0596	5,8084
11:06-11:16	55,1	64,3925	16,8648	9,2925
11:16-11:27	93,8	90,9500	3,0384	2,8500
11:27-11:37	26,9	28,5168	6,0104	1,6168
11:37-11:47	115,4	116,0392	0,5539	0,6392
11:47-11:57	69,9	62,1981	11,0185	7,7019

Fuente: Propia

Tabla 4.5 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_a medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	I_a (A) Analizador	I_a (A) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	1,64	1,6968	3,5897	0,0588
11:06-11:16	1,10	1,3556	23,7991	0,2606
11:16-11:27	1,51	1,6506	9,1667	0,1386
11:27-11:37	0,71	0,9404	33,0127	0,2334
11:37-11:47	1,65	1,6771	1,5809	0,0261
11:47-11:57	1,17	1,4092	20,0341	0,2352

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.6 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_b medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	I_b (A) Analizador	I_b (A) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	1,66	1,6711	0,7901	0,0131
11:06-11:16	1,11	1,3058	17,5338	0,1948
11:16-11:27	1,42	1,5183	6,9225	0,0983
11:27-11:37	0,66	0,9112	37,2289	0,2472
11:37-11:47	1,66	1,6324	1,5440	0,0256
11:47-11:57	1,12	1,2806	14,0338	0,1576

Fuente: Propia

Tabla 4.7 Cuadro comparativo de los valores RMS de I_c medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	I_c (A) Analizador	I_c (A) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	1,64	1,6144	1,6809	0,0276
11:06-11:16	1,06	1,3718	29,9053	0,3158
11:16-11:27	1,45	1,6317	12,9204	0,1867
11:27-11:37	0,80	0,9678	20,8240	0,1668
11:37-11:47	1,64	1,5922	2,7961	0,0458
11:47-11:57	1,20	1,4622	22,1554	0,2652

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.8 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase A medida por el prototipo y el analizador

Intervalos	Energía A (kWh) Analizador	Energía A (kWh) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	0,0328	0,0321	2,2796	0,0007
11:06-11:16	0,0098	0,0031	68,4007	0,0067
11:16-11:27	0,03	0,0185	29,7866	0,0078
11:27-11:37	0,003	0,0003	91,3079	0,0029
11:37-11:47	0,0327	0,0308	5,5710	0,0018
11:47-11:57	0,0127	0,0043	66,2455	0,0084

Fuente: Propia

Tabla 4.9 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase B medida por el prototipo y el analizador

Intervalos	Energía B (kWh) Analizador	Energía B (kWh) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	0,0335	0,0308	8,1812	0,0027
11:06-11:16	0,0128	0,0058	54,6834	0,0070
11:16-11:27	0,0225	0,0151	32,9138	0,0074
11:27-11:37	0,0033	0,0003	89,7845	0,0030
11:37-11:47	0,0338	0,0292	13,6542	0,0046
11:47-11:57	0,0113	0,0055	51,0379	0,0058

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.10 Cuadro comparativo de la Energía entregada por la fase B medida por el prototipo y el analizador

Intervalos	Energía C (kWh) Analizador	Energía C (kWh) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (V)
10:56-11:06	0,0313	0,0309	1,4252	0,0004
11:06-11:16	0,0110	0,0052	52,6214	0,0058
11:16-11:27	0,0232	0,0173	25,2836	0,0059
11:27-11:37	0,0038	0,0005	85,8830	0,0033
11:37-11:47	0,0318	0,0294	7,6915	0,0024
11:47-11:57	0,0132	0,0071	45,9492	0,0060

Fuente: Propia

Tabla 4.11 Cuadro comparativo de los THD's de Va medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Va (%) Analizador	THD de Va (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	9,2	13,6991	48,9033	4,4991
11:06-11:16	67,3	94,5604	40,5058	27,2604
11:16-11:27	38,8	47,2031	21,6575	8,4031
11:27-11:37	84,5	156,9863	85,7826	72,4863
11:37-11:47	14,5	18,8185	29,7828	4,3185
11:47-11:57	63,0	88,4674	40,4244	25,4674

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.12 Cuadro comparativo de los THD's de Vb medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Vb (%) Analizador	THD de Vb (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	12,8	13,6081	6,3133	0,8081
11:06-11:16	67,7	92,5787	36,7484	24,8787
11:16-11:27	48,2	51,7099	7,2820	3,5099
11:27-11:37	82,3	150,0252	82,2906	67,7252
11:37-11:47	12,8	19,0238	48,6234	6,2238
11:47-11:57	70,2	80,2834	14,3638	10,0834

Fuente: Propia

Tabla 4.13 Cuadro comparativo de los THD's de Vc medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Vc (%) Analizador	THD de Vc (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	14,4	13,4455	6,6285	0,9545
11:06-11:16	66,6	89,8273	34,8758	23,2273
11:16-11:27	45,5	61,4117	34,9708	15,9117
11:27-11:37	83	145,8895	75,7705	62,8895
11:37-11:47	9,5	20,3255	113,9526	10,8255
11:47-11:57	63,9	92,2917	44,4315	28,3917

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.14 Cuadro comparativo de los THD's de Ia medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Ia (%) Analizador	THD de Ia (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	11,8	18,4906	56,7000	6,6906
11:06-11:16	67,2	130,0262	93,4914	62,8262
11:16-11:27	37,5	62,2304	65,9477	24,7304
11:27-11:37	82,6	226,7810	174,5533	144,1810
11:37-11:47	9,9	25,7858	160,4626	15,8858
11:47-11:57	61,5	117,4401	90,9595	55,9401

Fuente: Propia

Tabla 4.15 Cuadro comparativo de los THD's de Ib medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Ib (%) Analizador	THD de Ib (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	9,4	16,9298	80,1043	7,5298
11:06-11:16	66,5	111,1060	67,0767	44,6060
11:16-11:27	46,8	73,7729	57,6344	26,9729
11:27-11:37	84	197,0380	134,5690	113,0380
11:37-11:47	14,1	25,8729	83,4957	11,7729
11:47-11:57	69,3	114,6073	65,3785	45,3073

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.16 Cuadro comparativo de los THD's de Ic medidos por el prototipo y el analizador

Intervalos	THD de Ic (%) Analizador	THD de Ic (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	10,9	19,6201	80,0009	8,7201
11:06-11:16	65	114,7227	76,4965	49,7227
11:16-11:27	45,4	63,0291	38,8306	17,6291
11:27-11:37	80,6	184,1552	128,4804	103,5552
11:37-11:47	11,1	26,3042	136,9748	15,2042
11:47-11:57	64	97,5894	52,4834	33,5894

Fuente: Propia

Al analizar las tablas anteriores se puede extraer que los promedios errores relativos de cada tipo de variable y teniendo como referencia al analizador son los siguientes:

- Voltaje: 6,63%
- Corriente: 14,42%
- Energía: 40,7%
- THD del Voltaje: 42,9%
- THD de la Corriente: 91,3%

Como se puede observar el error del voltaje es relativamente bajo, pero el de la corriente es alto, esto se debe al error que introducen las pinzas que básicamente son simples transformadores de corriente y que por su forma tienden a tener elevados flujos magnéticos dispersos.

Lo mismo sucede con la energía la cual arrastra el error del voltaje y la corriente. En el caso de los THD's se entiende que el error de la corriente resulte alto, pero con la tensión



se decidió revalidar el THD utilizando el algoritmo por definición de la Transformada Discreta de Fourier, implementado en una hoja de cálculo de Excel desarrollada por los investigadores. Ducho algoritmo con los cálculos realizados se encuentra en el CD del Anexo 1, en la carpeta “Hoja de Cálculo de TDF y THD”.

Para la validación se utilizó la misma data recabada por el prototipo en la campaña de prueba y se introdujo en la hoja de cálculo de Excel para así obtener los THD's y compararlos con los calculados por Interfaz de usuario de la presente investigación. A continuación se muestran las tablas comparativas 4.17, 4.18 y 4.19.

Tabla 4.17 Cuadro comparativo de los THD's de V_a calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel

Intervalos	THD de V_a (%) Algoritmo en Excel	THD de V_a (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	16,2398	13,6991	15,6447	2,5407
11:06-11:16	92,1247	94,5604	2,6439	2,4357
11:16-11:27	46,6956	47,2031	1,0868	0,5075
11:27-11:37	152,8968	156,9863	2,6747	4,0895
11:37-11:47	17,0549	18,8185	10,3404	1,7636
11:47-11:57	86,5611	88,4674	2,2022	1,9063

Fuente: Propia



Capítulo IV



Tabla 4.18 Cuadro comparativo de los THD's de Vb calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel

Intervalos	THD de Vb (%) Algoritmo en Excel	THD de Vb (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	17,6716	13,6081	22,9943	4,0635
11:06-11:16	91,8115	92,5787	0,8356	0,7672
11:16-11:27	51,1532	51,7099	1,0883	0,5567
11:27-11:37	147,4775	150,0252	1,7275	2,5477
11:37-11:47	17,3821	19,0238	9,4446	1,6417
11:47-11:57	78,2944	80,2834	2,5404	1,9890

Fuente: Propia

Tabla 4.19 Cuadro comparativo de los THD's de Vc calculados por la interfaz y el algoritmo en Excel

Intervalos	THD de Vc (%) Algoritmo en Excel	THD de Vc (%) Prototipo	Error Relativo (%)	Error Absoluto (A)
10:56-11:06	13,6933	13,4455	1,8096	0,2478
11:06-11:16	87,1560	89,8273	3,0650	2,6713
11:16-11:27	62,1531	61,4117	1,1929	0,7414
11:27-11:37	143,1890	145,8895	1,8860	2,7005
11:37-11:47	17,1223	20,3255	18,7078	3,2032
11:47-11:57	92,0755	92,2917	0,2348	0,2162

Fuente: Propia



En esta ocasión el promedio de los errores relativos es de 5,56% considerablemente más bajo que el anterior. Por lo que se puede decir que la medición del THD del voltaje es relativamente precisa.

4.4.2 Campaña de prueba de 1 día

La segunda Campaña de Medición se realizó en el Laboratorio de Maquinas Eléctricas de la Universidad de Carabobo, con el propósito de observar el comportamiento del prototipo durante una campaña de larga duración, y verificar la capacidad de la interfaz de procesar un gran volumen de data. El esquema de montaje es igual al de la campaña anterior, con la diferencia de que en este caso la carga resistiva es variable y capaz de consumir mayor potencia (La corriente de línea puede llegar hasta 5A), en la **figura 4.38** se puede apreciar el montaje realizado para esta prueba.

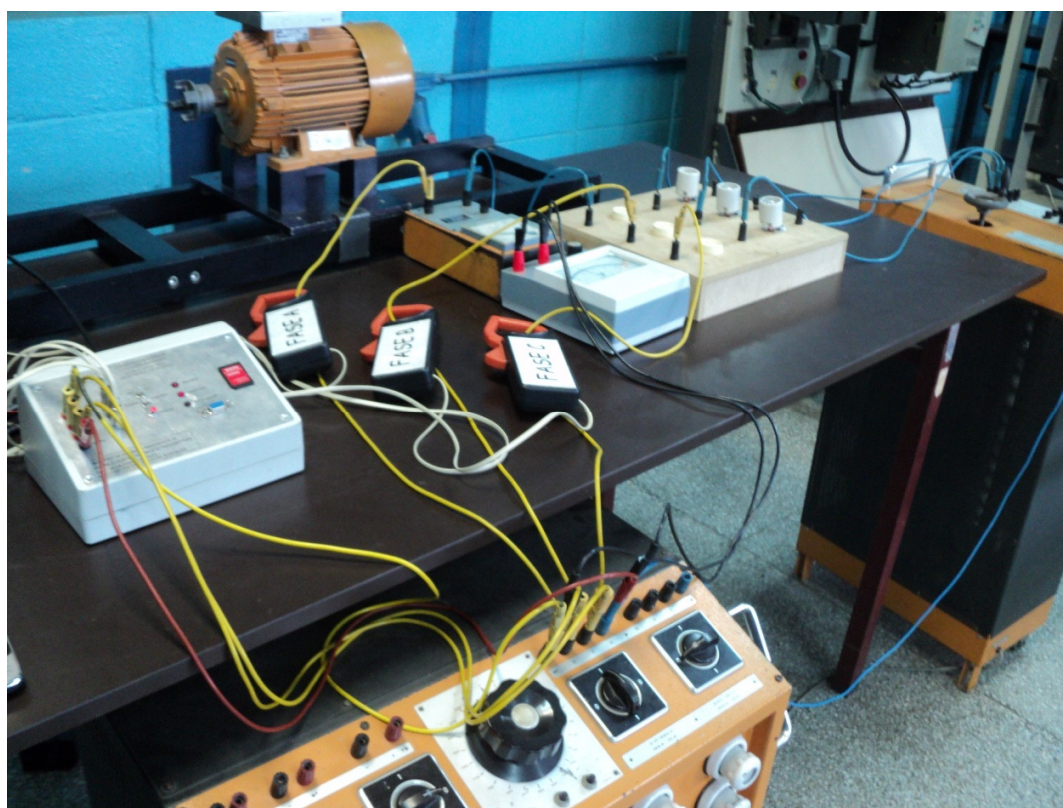


Figura 4.38 – Montaje para campaña de prueba de 1 día



Capítulo IV



Una vez realizada la campaña, la cual se llevo a cabo sin ningún contratiempo, se obtuvo un archivo de data de 24MB y esta se analizó con la interfaz desarrollada por los investigadores, y arrojó los resultados que se presentan en las **figuras 4.39, 4.40, 4.41, 4.42, 4.43, 4.44 y 4.45** las cuales indican las gráficas de las variables eléctricas medidas en la campaña.

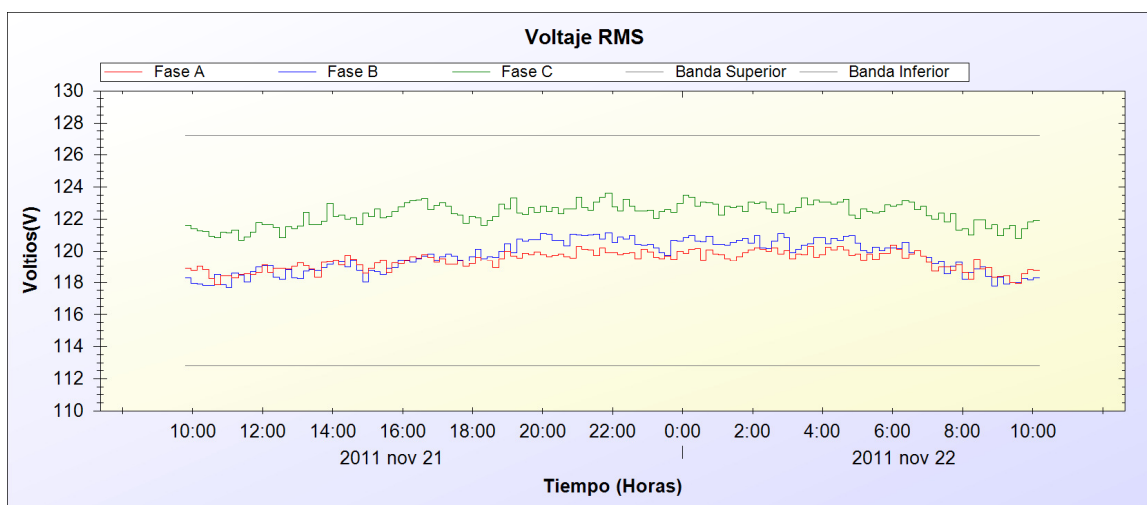


Figura 4.39 – Voltajes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día

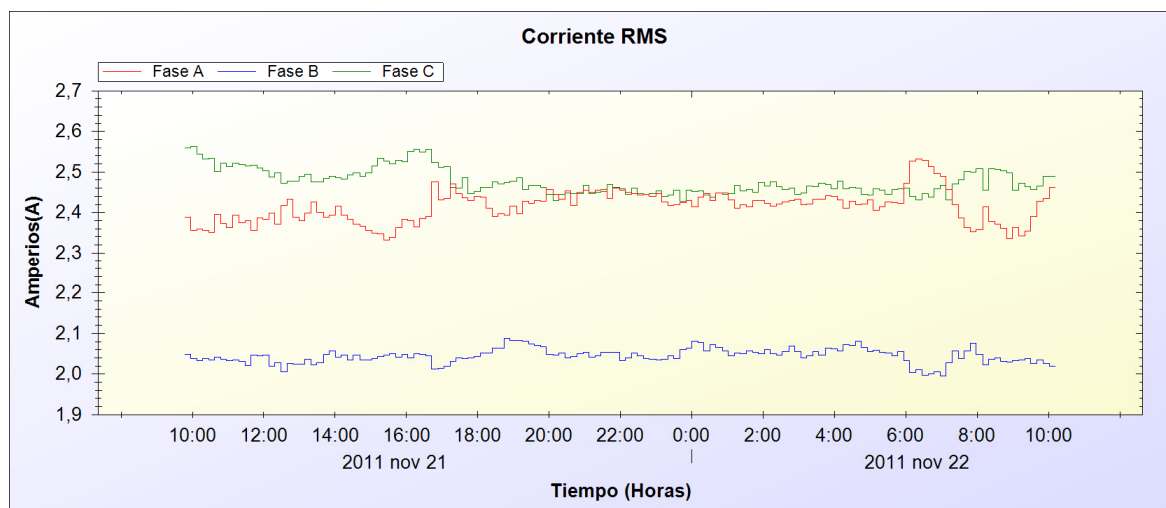


Figura 4.40 – Corrientes RMS promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día



Capítulo IV

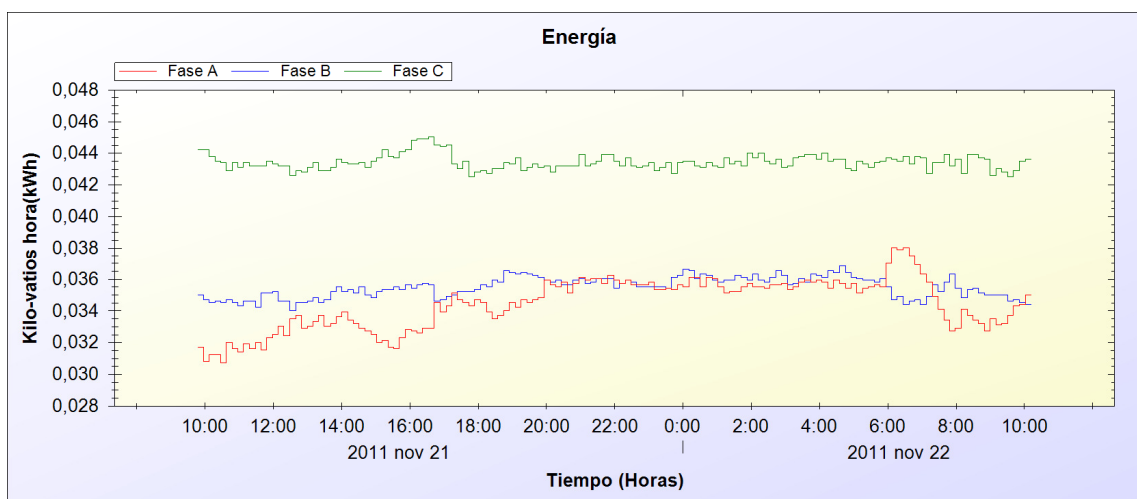


Figura 4.41 - Energía entregada en cada periodo de 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día

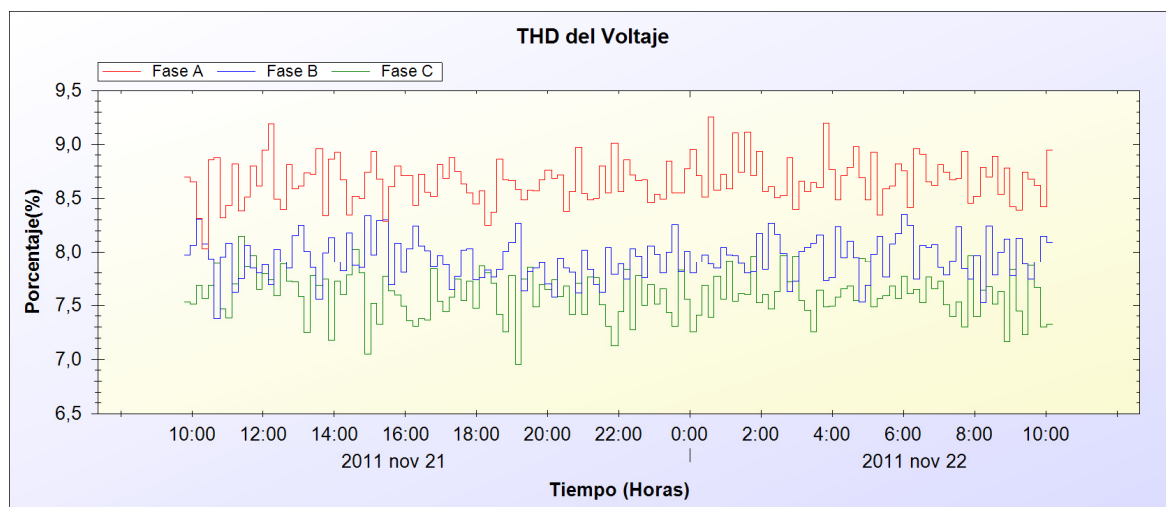


Figura 4.42 - THD's de los Voltajes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día



Capítulo IV

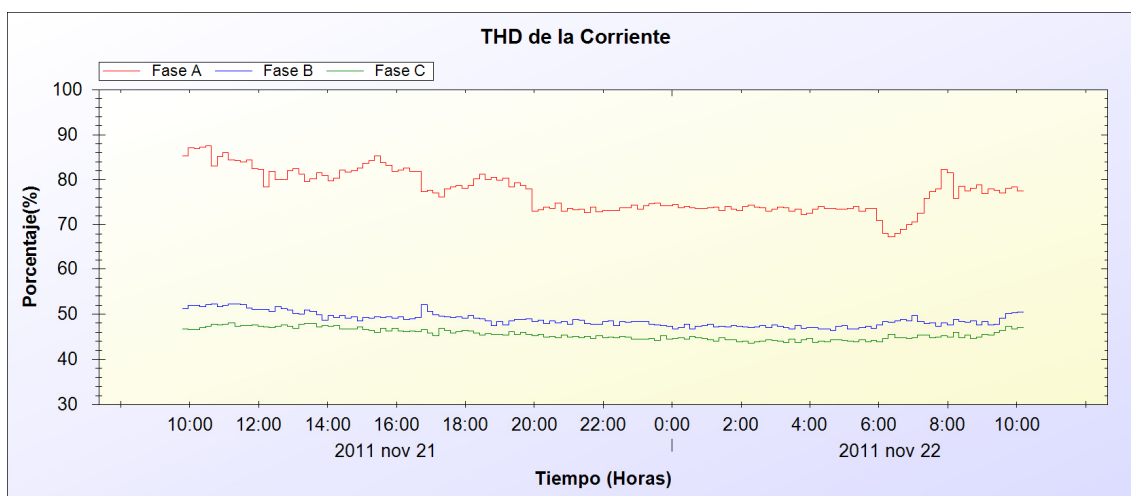


Figura 4.43 - THD's de las Corrientes promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 hora

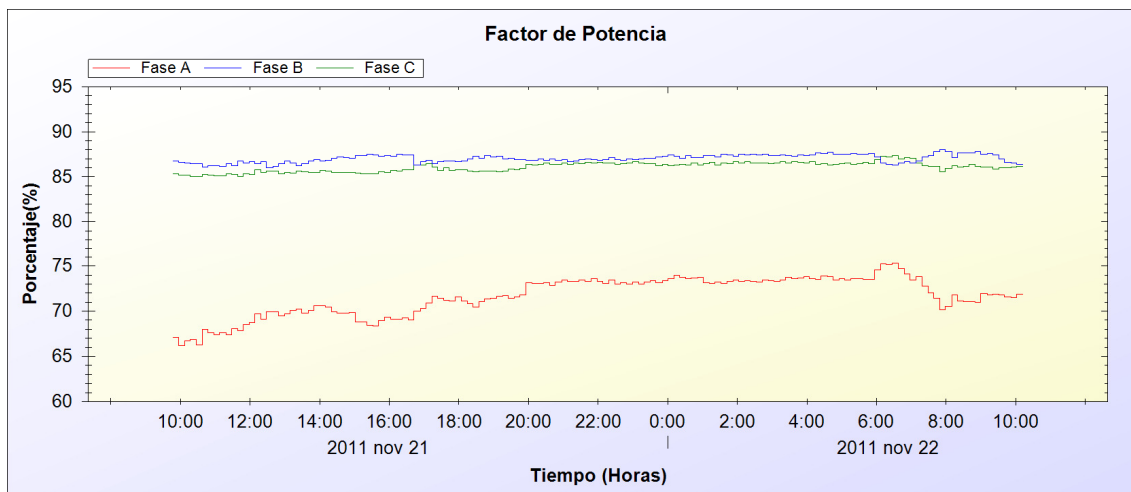


Figura 4.44 - Factores de Potencia promediados cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día

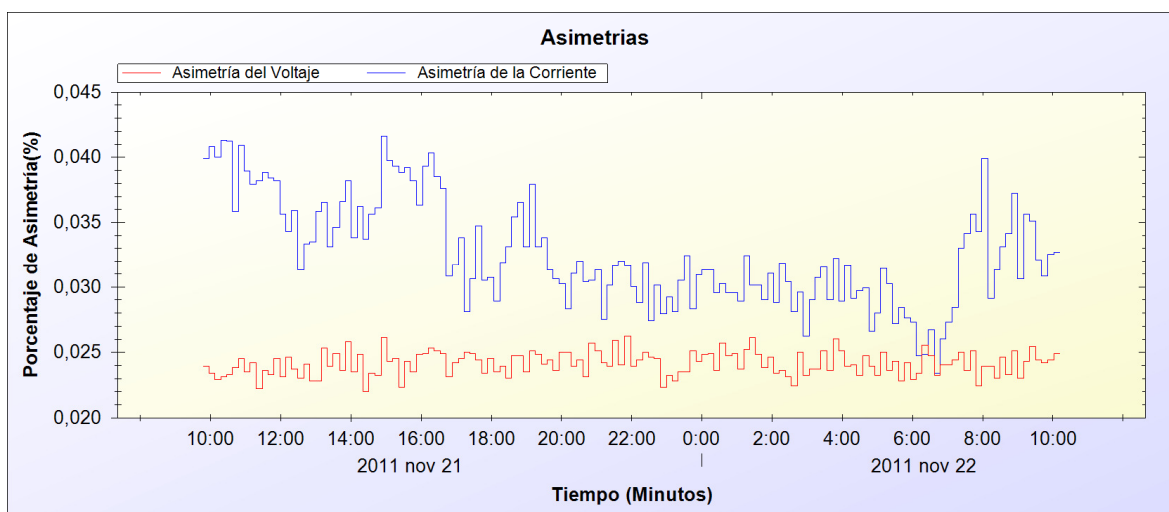


Figura 4.45 - Asimetrías promediadas cada 10 minutos de la campaña de prueba de 1 día

También se calcularon los índices de Calidad de Energía utilizando la interfaz, y los resultados fueron los siguientes:

- **FEDT: 0%**
- **FEES: 0%**

En este caso los índices obtenidos son iguales a cero debido que durante toda la campaña de medición los valores RMS de voltaje se mantuvieron dentro de la banda permitida (Se asumió densidad de carga “Muy Alta” por lo cual la banda utilizada fue de $\pm 5\%$). A la interfaz le tomó 9 minutos analizar toda la data, por lo que se estima que para un campaña de 1 semana le tome aproximadamente 63 minutos en analizar dicha campaña.

Los resultados obtenidos para esta campaña de medición demuestran que el prototipo y la interfaz diseñados y desarrollados en el presente trabajo son capaces de registrar y analizar data de campañas de larga duración.



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Se diseñó e implementó el prototipo de un registrador de variables eléctricas portátil trifásico para evaluar la calidad de energía, con el objetivo de proporcionar una herramienta al Departamento de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo en su línea de investigación de Calidad de Energía y Eficiencia Energética.

Se elaboró un hardware compuesto en primer lugar por una tarjeta de acondicionamiento de señales, la cual toma la tensión y corriente de la red que se desea evaluar y las convierte en señales que oscilan entre 0-5V a través de la utilización de amplificadores operacionales, de manera tal que puedan ser captadas por el conversor analógico digital.

En segundo lugar presenta una tarjeta de adquisición de datos gobernada por el microcontrolador DSPIC30F6014A de la compañía Microchip, cuyo conversor analógico digital tiene 12 bits de resolución, la tarjeta posee también un reloj de tiempo real DS1307 que sirve de referencia temporal para las mediciones y la capacidad de almacenar la data recolectada en una memoria micro SD de 256 MB.

El software de funcionamiento del microcontrolador fue desarrollado con el compilador Mikrobasic de la compañía Mikroelektronika, y se encarga de gestionar las adquisición de la data, establecer la comunicación de tipo I2C con el reloj de tiempo real y la comunicación de tipo SPI con la memoria micro SD.



Capítulo V



La interfaz usuario se programó en el lenguaje Visual Basic.NET, y sus funciones son:

- Programar al equipo registrador vía puerto serial con la duración de la Campaña de Medición.
- Procesar las muestras recolectadas por el equipo registrador, para luego mostrar las graficas de las variables eléctricas de interés y calcular los índices de Calidad de Energía.
- Generar un reporte en PDF con toda la información anterior.

Se realizaron dos Campañas de Medición, la primera fue de una hora conectando al equipo registrador a medir simultáneamente con el Analizador de Parámetros Eléctricos que se encuentra en el Laboratorio de Circuitos y Mediciones, se utilizó como carga trifásica un banco de 3 bombillos de 200W con 3 dimmers conectados en serie para controlar los valores RMS de tensión y corriente y los THD. Los errores relativos promedios por tipo de variable y teniendo como referencia al analizador fueron:

- Voltaje: 6,63%
- Corriente: 14,42%
- Energía: 40,7%
- THD del Voltaje: 42,9%
- THD de la Corriente: 91,3%

Se pudo observar que las pinzas amperimétricas de tipo transformador de corriente utilizadas introducen errores relativos de aproximadamente 91,3% en el cálculo del THD de las corrientes, esto debido al bajo ancho de banda que estas ofrecen (Alrededor de 60Hz) y al abundante flujo magnético disperso. Esto aplica también para el valor RMS de la corriente pero en menor grado. Con respecto al THD del voltaje, se decidió hacer una segunda comparación utilizando la misma data recabada por el



prototipo, pero esta vez calculando el THD de la Transformada Discreta de Fourier por definición en una hoja de cálculo de Excel, al compararlo con el calculado por la interfaz el error relativo del THD del voltaje fue de 5,56%, considerablemente más bajo que el anterior. Por lo que se puede decir que la medición del THD del voltaje es relativamente precisa.

Para poder disminuir el error relativo introducido por las Pinzas Amperimétricas de tipo Transformador de Corriente, se maneja la posibilidad de adquirir pinzas amperimétricas de Efecto Hall, ya que estas ofrecen una mayor precisión y linealidad, además de tener la capacidad de captar corrientes DC. Esto no fue posible debido a que este tipo de pinzas no están disponibles en el mercado nacional, y realizar el proceso de procura mediante un proveedor en el exterior del país no está contemplado en los procedimientos para compra de materiales e insumos que establece la LOCTI.

En la segunda campaña se conectó el equipo a medir durante un día completo, la campaña se realizó sin ningún tipo de contratiempos en el Laboratorio de Maquinas Eléctrica de la Universidad de Carabobo y se corroboró que el equipo es capaz de realizar mediciones por largos períodos de tiempo. En esta campaña a diferencia de la anterior se trabajó con una carga resistiva variable y de mayor potencia (Hasta 600W de capacidad por fase). La interfaz de usuario analizó de la data recabada por el prototipo en 9 minutos, por lo que se estima que el procesamiento de una campaña de 1 semana se realice en 63 minutos.

El equipo registrador tarda aproximadamente 7 segundos almacenando un ciclo de las 6 señales en la memoria, es decir 384 muestras, por lo que solo se pueden obtener 86 valores RMS cada 10 minutos en vez de 600 como lo exige la Norma de Fiscalización de Empresas de Distribución de Electricidad.



5.2 Recomendaciones

- ✓ Para futuras mejoras del prototipo utilizar un conversor analógico digital independiente del microcontrolador trabajando como esclavo y así poder seleccionar uno de 14 o más bits de resolución para así cumplir con la Norma.
- ✓ Adquirir pinzas amperimétricas de Efecto Hall que ofrecen una mayor precisión y linealidad, además de tener la capacidad de captar corrientes DC.
- ✓ Con respecto al almacenamiento en la memoria micro SD, se recomienda realizar estudios para ejecutar la programación de manera manual en vez de utilizar la librería de Mikrobasic, esto con el objetivo de hacer el almacenamiento más rápido. Para ello se debe estudiar el modo funcionamiento de las memorias SD.
- ✓ Se puede programar la interfaz de usuario para que tome la hora y fecha de la computadora y la envíe vía serial cuando se esté programando al equipo con la duración de la campaña de medición y así mantener al reloj de tiempo real calibrado todo el tiempo.
- ✓ Para proteger al prototipo de interferencias electromagnéticas, se recomienda diseñar un cerramiento metálico capaz de aislar electromagnéticamente los componentes internos del prototipo.
- ✓ Estudiar el funcionamiento de display digitales de alta definición, para que en futuros diseños se permita observar los espectros de frecuencia de las señales de mayor magnitud.
- ✓ Los diseños de la línea de investigación de calidad de energía deberán ser sometidos a las pruebas de SENCAMER, para obtener la certificación que permita ser utilizado en campañas de medición de la Universidad de Carabobo que sirvan como fuente de información para realizar mejoras en la calidad de energía en el sistema eléctrico nacional.
- ✓ Se recomienda que para futuros diseños y/o modificaciones de las tarjetas de acondicionamiento y adquisición, estas sean fabricadas por una empresa especialista en el campo de los circuitos impresos.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PUCHE y ROJAS (2007), Trabajo de Grado, Diseño y Construcción de un Instrumento Portátil de Registro y Análisis de Variables Eléctricas de Calidad de Energía. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- [2] PEÑA y RAGA (2002), Trabajo de Ascenso, Calidad de Energía en Sistemas Eléctricos. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.
- [3] SOLO ENERGÍA. Ahorro de Energía. Tomado de la red mundial el 15 de enero de 2010 del sitio: www.soloenergia.com.ar
- [4] Gaceta oficial de La República Bolivariana de Venezuela Nro. 38006. (Caracas, lunes 23 de agosto de 2004). Normas de Calidad Del Servicio Comercial.
- [5] ELECTRICIDAD DE CARACAS. Glosario de términos. Tomado de la red mundial el 13 de enero de 2010 del sitio: www.laedc.com.ve.
- [6] DUGAN, E. (1996) Electrical Power System Quality. Mc. Graw - Hill. New York, USA.
- [7] IEEE Std 1159 – 1995 (1995) IEEE Recommended Practice on Monitoring Electrical Power Quality. New York, USA.
- [8] IEEE Std 519-1992. (12 de abril de 1993) IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in electrical Power System. New York, USA.
- [9] POSADA (1998) Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Interpolación en Tiempo Real. Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] Universidad Tecnológica Nacional, Teoría de los Circuitos I . Tomado de la red mundial el 10 de julio de 2011 del sitio: <http://www.frm.utn.edu.ar/circuitos1/Apuntes/Libro2090.doc>
- [11] IEC 60050-161 (1990) Electromagnetic Compatibility, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza.
- [12] IEC 61000-3-13 (2008) Assessment of Emission Limits for the Connection of Unbalanced Installation to MV, HV and EHV, International Electrotechnical Commission, Ginebra, Suiza.



Referencias Bibliográficas



- [13] PARIS (2005), Trabajo de Grado, Rediseño de un Sistema de Adquisición para Señales de Potencia. Universidad Simón Bolívar Sartenejas Venezuela.
- [14] ROSO CONTROL. Microprocesadores y microcontroladores. Tomado de la red mundial el 06 de enero de 2010 del sitio: <http://www.roso-control.com/>.
- [15] ANGULO, José (2.006) Dspic diseño práctico de aplicaciones Mc. Graw - Hill. Madrid, España.
- [16] RS-232. Wikipedia. Tomado de la red mundial el 17 de junio de 2011 del sitio: <http://es.wikipedia.org/wiki/RS-232>.
- [17] Comunicación - Bus I2C Descripción y funcionamiento. Robots. Tomado de la red mundial el 17 de junio de 2011 del sitio: http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm
- [18] Protocolo SPI. Ingeniería de los Microcontroladores. Tomado de la red mundial el 17 de junio de 2010 del sitio: <http://www.i-micro.com/pdf/articulos/spi.pdf>
- [19] ELECTRÓNICA FÁCIL. Amplificadores operacionales. Tomado de la red mundial el 06 de enero de 2010 del sitio: <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/>
- [20] UNIVERSIDAD ARTURO PRAT. Electrónica analógica. Tomado de la red mundial el 10 de febrero de 2010 del sitio: <http://www.unap.cl>